UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HYAN KELLYTON GONTIJO DE LIMA

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PROPRIETÁRIO DE USO ACADÊMICO PARA CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO E ASSIMÉTRICO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

CURITIBA

2022

HYAN KELLYTON GONTIJO DE LIMA

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PROPRIETÁRIO DE USO ACADÊMICO PARA CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO E ASSIMÉTRICO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Development of proprietary software for academic use to calculate symmetrical and asymmetrical short circuits in electrical power systems

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof.ª Dra. Andrea Lucia Costa

CURITIBA

2022

4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

HYAN KELLYTON GONTIJO DE LIMA

DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PROPRIETÁRIO DE USO ACADÊMICO PARA CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO E ASSIMÉTRICO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 29/agosto/2022

Andrea Lucia Costa
Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Eloi Rufato Junior
Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Nastasha Salame da Silva
Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

CURITIBA
2022

Dedico sobretudo a Deus! Dedicado aos meus pais Sandra e Antonio, e a todos os professores que contribuíram para minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço a minha orientadora Prof.(a) Dr.(a) Andrea Lúcia Costa, pelo voto de confiança e pela paciência, tanto por ter acreditado na ideia deste TCC2, quanto por me conduzir até o pleno entendimento sobre o assunto de curtos-circuitos. Durante um período tão turbulento, como foram os anos de 2020-2022, sou muito grato pelo seu profissionalismo e apoio.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família por ter me conduzido à vida dos estudos, sendo meu pai, Antonio, meu primeiro professor de Matemática, e minha mãe, Sandra, minha primeira professora de Português. Por causa deles mantive minha envergadura acadêmica, apesar de todas as adversidades.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Um escritor que diz que não há verdades, ou que toda a verdade é “meramente relativa”, está pedindo que você não acredite nele. Então não creia.” (Roger Scruton – In memoriam, 1944-2020) (SCRUTON, 1996, p. 6).

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma aplicação computacional para cálculo de curto-circuito no Sistema Elétrico de Potência – SEP. Este programa computacional, denominado de SHOT-C, calcula e apresenta as matrizes de admitância e impedância de barras de sistemas de pequeno porte, em topologia radial e em anel. Além disso, esta aplicação fornece as correntes de sequência, bem como as correntes de fase, para os quatro tipos de curto-circuitos mais comuns: monofásico-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico. A aplicação computacional é um software construído com a linguagem C e as interfaces de usuário da biblioteca gráfica IUP. O projeto do software foi desenvolvido para uso acadêmico, podendo também ser utilizado por professores e engenheiros de proteção para estudo e aprofundamento de projetos, razão pela qual as entradas são valores reais, que são depois convertidas para valores por unidade (p.u.). Foram feitas várias simulações computacionais utilizando o software SHOT-C. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de referências bibliográficas, obtendo-se uma equivalência entre os mesmos com margem de erro menor que 1%.

Palavras-chave: curto-circuito; componentes simétricas; interfaces de usuário portátil - iup; correntes de falta.

ABSTRACT

The present work presents a computational application development for short circuit calculation in the Electric Power System – EPS. This computational program, called SHOT-C, calculates and displays the admittance matrices and bus impedances of a small number bus systems, in radial and ring topology. In addition, this application provides the sequence currents as well as the phase currents, for the four most common types of short circuits: single-phase-to-ground, two-phase, two-phase-to-ground and three-phase. The computational application is a software built with the C language and the IUP graphical library user interfaces. The software design was developed for academic purpose, but can also be used by professors and protection engineers to study and deepening of projects, reason why the entries are real values, later converted into values per unit (p.u.). Several computer simulations were performed using the SHOT-C software. The obtained results were compared with the results of bibliographic references, obtaining an equivalence between them with an error margin smaller than 1%.

Keywords: short-circuit; symmetrical components; portable user interface - iup; fault currents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tripé metodológico do TCC 23

Figura 2 – Diagrama unifilar em curto-circuito trifásico 28

Figura 3 – Diagrama de impedância em curto-circuito trifásico 29

Figura 4 – Diagramas fasorial do curto-circuito 31

Figura 5 – Equivalente de Thévenin em curto-circuito trifásico 31

Figura 6 – Diagrama fasorial de sequência positiva 34

Figura 7 – Diagrama fasorial de sequência negativa – Real 34

Figura 8 – Diagrama fasorial de sequência zero 35

Figura 9 – Diagramas fasoriais de componentes simétricas – adaptado: (a) Seq. Positiva (b) Seq. Negativa (c) Seq. Zero 36

Figura 10 – Circuitos de sequência da máquina síncrona em curto trifásico: (a) Sequência Positiva (Bloco 1); (b) Sequência Negativa (Bloco 2); (c) Sequência Zero (Bloco 0) 39

Figura 11 – Circuitos de sequência da máquina síncrona em curto bifásico: conexão paralela 40

Figura 12 – Circuitos de sequência da máquina síncrona em curto bifásico-terra: conexão paralela 42

Figura 13 – Modelos de Sequência da máquina síncrona em curto monofásico-terra: conexão série 44

Figura 14 – Modelos de Sequência Zero do Transformador monofásico de núcleo envolvente com primário estrela aterrado 46

Figura 15 – Modelos de Sequência Zero do Transformador monofásico de núcleo envolvente 47

Figura 16 – Modelos de Sequência Zero do Transformador trifásico de núcleo envolvido 47

Figura 17 – Modelos de Sequência para uma LT 3ϕ e uma Carga 3ϕ 50

Figura 18 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito monofásico 53

Figura 19 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito trifásico . 54

Figura 20 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito bifásico . 56

Figura 21 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito bifásico-terra . . . 56
Figura 22 – Exemplo de um diagrama unifilar de um SEP de N barras em regime estacionário . . . 60
Figura 23 – Método de sobreposição do diagrama de sequência positiva: (a) Exemplo de um diagrama unifilar para um SEP de N barras em regime estacionário; (b) Circuito 1; (c) Circuito 2 . . . 61
Figura 24 – Fluxograma da matriz inversa – MÉTODO 1 . . . 72
Figura 25 – Filosofia de desenvolvimento do *software* SHOT-C . . . 77
Figura 26 – Interface Gráfica de Usuário do SHOT-C . . . 78
Figura 27 – Executável do *software* SHOT-C . . . 79
Figura 28 – Interface Gráfica de Usuário do Fórmulário do SHOT-C . . . 79
Figura 29 – Fluxograma do *software* SHOT-C . . . 80
Figura 30 – Circuito unifilar SYSTEM 5A . . . 84
Figura 31 – Diagrama de admitâncias SYSTEM 5A . . . 84
Figura 32 – Entrada do número barras do SYSTEM 5A no Fórmulário do SHOT-C . . . 86
Figura 33 – Entradas no Fórmulário do SHOT-C para as LTs do SYSTEM 5A . . . 86
Figura 34 – Entradas no Fórmulário do SHOT-C para as GEs do SYSTEM 5A . . . 87
Figura 35 – Entradas no Fórmulário do SHOT-C para a base do SYSTEM 5A . . . 88
Figura 36 – Saídas no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A . . . 89
Figura 37 – Janela de saídas no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A . . . 90
Figura 38 – Recorte da saída Y-Barra no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A 90
Figura 39 – Recorte da saída Z-Barra no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A 91
Figura 40 – SYSTEM 7K . . . 92
Figura 41 – Recorte da entrada de dados do gerador G2 no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K . . . 94
Figura 42 – Recorte da entrada de dados da LT24 à 70% no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K . . . 94
Figura 43 – Recorte da entrada de dados do TR1 no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K . . . 95
Figura 44 – Recorte da interface gráfica de usuário no SHOT-C das possíveis ligações para o TR1 para o SYSTEM 7K . . . 96

Figura 45 – Recorte da interface gráfica de usuário no SHOT-C da base para o SYSTEM 7K 97
Figura 46 – Recorte da resultante da base 1 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 97
Figura 47 – Recorte da resultante da base 2 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 98
Figura 48 – Recorte da resultante da base 3 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 98
Figura 49 – Recorte da resultante da base 4 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 98
Figura 50 – Recorte da resultante da base 5 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 98
Figura 51 – Recorte da resultante da base 6 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 99
Figura 52 – Recorte da resultante da base 7 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 99
Figura 53 – Recorte do carregamento de Y-Barra e Z-Barra após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K 99
Figura 54 – Recorte da planilha de Y-Barra positiva à partir do SHOT-C para o SYSTEM 7K 100
Figura 55 – Recorte da planilha de Z-Barra positiva à partir do SHOT-C para o SYSTEM 7K 100
Figura 56 – Recorte da exportação de Z-Barra positiva à partir do SHOT-C para o SYSTEM 7K 101
Figura 57 – Visualização de Z-Barra positiva exportada do SHOT-C para o SYSTEM 7K à partir do navegador de internet Opera 101
Figura 58 – Visualização de Z-Barra negativa exportada do SHOT-C para o SYSTEM 7K à partir do navegador de internet Opera 102
Figura 59 – Visualização de Z-Barra zero exportada do SHOT-C para o SYSTEM 7K à partir do navegador de internet Opera 102
Figura 60 – Recorte da interface gráfica de curto-circuito monofásico do SHOT-C para o SYSTEM 7K 104

Figura 61 – Recorte 2 da interface gráfica de curto-circuito monofásico do SHOT-C para o SYSTEM 7K 105
Figura 62 – Janela 01/05 de instalação do SHOT-C 114
Figura 63 – Janela 02/05 de instalação do SHOT-C 115
Figura 64 – Janela 03/05 de instalação do SHOT-C 115
Figura 65 – Janela 04/05 de instalação do SHOT-C 116
Figura 66 – Janela 05/05 de instalação do SHOT-C 116
Figura 67 – Janela inicial do SHOT-C – Detalhamento 117
Figura 68 – Janela do Formulário do SHOT-C – Detalhamento 118
Figura 69 – Janela do Formulário do SHOT-C – 7 passos 120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados gerais do SYSTEM 5A **83**
Tabela 2 – Dados de reatâncias de LT do SYSTEM 7K **92**
Tabela 3 – Dados de reatâncias de máquinas síncronas do SYSTEM 7K **93**
Tabela 4 – Dados dos transformadores do SYSTEM 7K **93**
Tabela 5 – Resultados comparativos de erro percentual do equivalente de Thévenin à 70% da LT24 no SYSTEM 7K **103**
Tabela 6 – Resultados comparativos de erro percentual das correntes para uma falta monofásica à 70% da LT24 do SYSTEM 7K **106**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GLU	Biblioteca de utilitários OpenGL, do inglês *OpenGL Utility Library*
GLUT	Kit de ferramentas do utilitário OpenGL, do inglês *OpenGL Utility Toolkit*
IUP	Interface de usuário portátil, do inglês *Portable User Interface*
JIT	"na hora certa", do inglês *just-in-time*
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões
LT	Linha de Transmissão
LTC	Linha de Transmissão Curta
LTM	Linha de Transmissão Média
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts, do inglês *Massachusetts Institute of Technology*
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TAT	Transformador de Aterramento
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
URL	Localizador Uniforme de Recursos, do inglês *Uniform Resource Locator*
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Gregas

ϕ	Fase

Sobrescritos

-1	Inversa
$+$	Sequência Positiva
$-$	Sequência Negativa
0	Sequência Zero

Subscritos

$n-1$	Sequência Positiva da barra n
$n-2$	Sequência Negativa da barra n
$n-0$	Sequência Zero da barra n
$BARRA$	Matriz de n barras

Notações

$\bar{Y}^{+}_{BARRA}$	Matriz de admitâncias generalizada de sequência positiva
$\bar{Y}^{-}_{BARRA}$	Matriz de admitâncias generalizada de sequência negativa
$\bar{Y}^{0}_{BARRA}$	Matriz de admitâncias generalizada de sequência zero
$\bar{Z}^{+}_{BARRA}$	Matriz de impedâncias generalizada de sequência positiva
$\bar{Z}^{-}_{BARRA}$	Matriz de impedâncias generalizada de sequência negativa
$\bar{Z}^{0}_{BARRA}$	Matriz de impedâncias generalizada de sequência zero
$p.u.$	por-unidade
FMM	Força magnetomotriz

Notações

Y-Barra	Matriz de admitâncias de um SEP de N barras
Z-Barra	Matriz de impedâncias de Thévenin de um SEP de N barras
$\dot{a}$	Operador rotacional a
T	Matriz de transformação das componentes simétricas
T^{-1}	Matriz inversa de transformação das componentes simétricas
$\dot{I}_{n-1}$	Corrente generalizada de sequência positiva
$\dot{I}_{n-2}$	Corrente generalizada de sequência negativa
$\dot{I}_{n-0}$	Corrente generalizada de sequência zero

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20

1.1 Tema 20

1.1.1 Delimitação do Tema 20

1.2 Objetivos 21

1.2.1 Objetivo Geral 21

1.2.2 Objetivos Específicos 21

1.3 Justificativa 22

1.4 Procedimentos Metodológicos 22

1.4.1 Levantamento bibliográfico 23

1.4.2 Metodologias para cálculo de Z Thévenin 24

1.4.3 Aspectos metodológicos de desenvolvimento do *software* SHOT-C 24

1.5 Estrutura do trabalho 25

2 CURTOS-CIRCUITOS 27

2.1 Introdução 27

2.2 Diagrama de impedância de curto-circuito 27

2.2.1 Simplificações adaptativas para cálculo de curto-circuito 29

2.3 Componentes simétricas 32

2.3.1 Teorema de Fortescue 32

2.3.1.1 Diagramas fasoriais de sequência 33

2.3.1.2 Operador rotacional a 35

2.3.1.3 Representação analítica 35

2.3.1.4 A matriz inversa de transformação 36

2.3.1.5 Corrente de neutro 37

2.4 Circuitos de sequência das componentes simétricas 37

2.4.1 Tensão de falta do curto-circuito 38

2.4.2 Circuitos de sequência da máquina síncrona 38

2.4.2.1 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 3ϕ 39

2.4.2.2 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 2ϕ 40

2.4.2.3 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 2ϕ-terra 41

2.4.2.4 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 1ϕ-terra 43

2.4.3 Modelos de sequência do transformador 45
2.4.4 Modelos de sequência de linhas de transmissão (LT) e cargas lineares . . . 48
2.4.5 Modelos de sequência via Rakes de Impedâncias de Thévenin (RIT) 51
2.4.5.1 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito monofásico 52
2.4.5.2 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito trifásico 54
2.4.5.3 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito bifásico 55
2.4.5.4 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito bifásico-terra 56
2.5 Conclusão do capítulo 57
3 MÉTODO MATRICIAL DE OBTENÇÃO DE Z-BARRA DE ORDEM ATÉ 10X10 58
3.1 Introdução 58
3.2 A matriz de admitâncias Y-Barra 58
3.3 A origem das matrizes Z-Barra 59
3.3.1 A origem da matriz Z-BARRA positiva 60
3.3.2 A origem da matriz Z-BARRA negativa 63
3.3.3 A origem da matriz Z-BARRA zero 64
3.4 Construção da matriz Y-Barra de N barras 65
3.4.1 A origem da matriz Y-BARRA positiva 66
3.4.2 A origem da matriz Y-BARRA negativa 67
3.4.3 A origem da matriz Y-BARRA zero 67
3.5 Obtenção da matriz Z-Barra de N barras via Y-Barra 68
3.5.1 Expressões adotadas para cálculo da matriz inversa 69
3.6 Conclusão do capítulo 73
4 SOFTWARE SHOT-C 74
4.1 Introdução 74
4.2 Arcabouço do desenvolvimento de *software* para curtos-circuitos . . . 74
4.3 Viabilidade de uso e expansão no meio acadêmico 75
4.4 Aplicação da metodologia de desenvolvimento de *software* sobre o SHOT-C 76
4.4.1 Desenvolvimento de *software* enxuto - Método Ágil *LEAN* 76
4.4.2 Janela inicial do SHOT-C 77
4.4.3 Fluxograma de entrada de dados 78
4.5 Problemas encontrados no desenvolvimento do SHOT-C 80

4.6 Conclusão do capítulo 81
5 RESULTADOS DE TESTES – SIMULAÇÃO DE UNIFILARES 82
5.1 Introdução 82
5.2 Unifilar SYSTEM 5A 83
5.2.1 Unifilar SYSTEM 5A - Resultados finais 88
5.3 Unifilar SYSTEM 7K 92
5.3.1 Unifilar SYSTEM 7K - Resultados finais 93
5.3.2 Unifilar SYSTEM 7K - Resultados de processamento de Y-Barra e Z-Barra . 100
5.3.3 Unifilar SYSTEM 7K - Resultados de processamento das correntes de sequência e correntes reais 103
5.4 Conclusão do capítulo 106
6 CONCLUSÕES FINAIS 107
6.1 Disponibilidade do SHOT-C em servidor 108
6.2 Projetos futuros 108
REFERÊNCIAS 110
APÊNDICE A MANUAL DO USUÁRIO DO *SOFTWARE* SHOT-C 114
A.1 Instalação do *software* SHOT-C 114
A.2 Uso do *software* SHOT-C 117
A.3 Exemplos práticos - Roteiro em 7 passos 121

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

O fornecimento de eletricidade é feito por concessionárias que possuem concessão do Estado por algumas décadas (ANEEL, 2015), concessão que se mantém no caso das mesmas conseguirem entregar resultados anuais exigidos pelos órgãos regulamentadores do Estado na esfera federal. No Brasil, cada unidade federativa possui a atuação de uma ou mais concessionárias de energia elétrica, sendo possível uma atuação interestadual. De modo geral, há alguns requisitos para as concessionárias de energia elétrica, dentre estes, tem-se a identificação e a supressão das faltas na rede elétrica visando diminuir os índices de DEC/FEC exigidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) são índices de qualidade do fornecimento baseados no cálculo do tempo e a frequência em que os consumidores ficam desconectados da rede, ou seja, interrupções de energia elétrica ocasionadas por curtos-circuitos, manutenções programadas, novas obras ou novos rearranjos de rede (GAERTNER; GONÇALVES, 2015). Dada a necessidade de manter os índices DEC/FEC dentro dos padrões exigidos, os profissionais das empresas distribuidoras de energia elétrica buscam gerenciar os tempos de saídas programadas de equipamentos de modo que sejam o menor tempo possível. Eles também procuram mitigar os danos causados por curtos-circuitos na rede devido às condições metereológicas, acidentes, vandalismo entre outras causas.

Considerando a ocorrência de curto-circuitos mencionados, ou identificação e supressão de faltas, é evidenciado a necessidade de estudo dessas ocorrências. O estudo sobre curtos-circuitos faz parte da formação do engenheiro eletricista, sendo visto nas disciplinas sobre Sistemas de Potência. Ao estudar os modelos representativos da rede os futuros profissionais podem calcular as correntes de falta de forma a garantir a proteção da rede elétrica e das pessoas.

O *software* desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo otimizar o estudo sobre curto-circuito de modo geral, para o meio acadêmico, servindo como alternativa para o estudo sobre os circuitos equivalentes de Thévenin e as correntes de faltas nas barras de um SEP.

1.1.1 Delimitação do Tema

A origem de um curto-circuito ocorre de forma randômica e indesejável em qualquer ponto do Sistema Elétrico de Potência (SEP) e, caso não seja combatido, pode acarretar em danos aos equipamentos da rede elétrica. De acordo com Sato e Freitas (2015), os curtos-circuitos que ocorrem com maior frequência são os curtos fase-terra (ou monofásico). Já os curtos-

circuitos trifásicos são os de menor ocorrência, contudo os mais severos. Neste TCC são implementados os tipos mais comuns de curtos-circuitos, sendo o trifásico conhecido como curto-circutio simétrico e os demais, monofásico, bifásico e bifásico à terra, como curtos-circuitos assimétricos.

Para o estudo de curto-circuito, neste trabalho são representadas as linhas, os transformadores de dois enrolamentos (não são considerados transformadores de 3 enrolamentos) e os geradores como impedâncias (que são os elementos em série), e não são representados as cargas, a capacitância das linhas, os capacitores e os reatores, que são os elementos de derivação. Este TCC também considera a impedância de grandes motores ou grupo de motores, os quais podem influenciar no cálculo da corrente de falta no SEP.

O *software* desenvolvido, SHOT-C, pode ser estudado em sistemas elétricos em anel e radial, contudo as impedâncias são somente reatâncias, ou seja, sem a parte resistiva (real). Logo, em situações nas quais há presença de impedâncias com parte resistiva que não pode ser desprezada não se aplica o SHOT-C, como é o caso dos Sistemas de Distribuição ou Sistema de Distribuição Radial, como exemplificado por Kindermann (2007, p. 206-218) e Bichels (2018, p. 36).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um *software* proprietário de cálculo de curtos-circuitos simétricos e assimétricos de SEP, para uso acadêmico, baseado em linguagem C, na biblioteca gráfica de interfaces de usuário IUP e na teoria de componentes simétricas.

1.2.2 Objetivos Específicos

As etapas deste trabalho consistem em:

a) Pesquisar bibliografias sobre curtos-circuitos simétrico e assimétrico; sobre o Teorema de Fortescue e as componentes simétricas; e sobre os diagramas de sequência zero dos transformadores de dois enrolamentos;

b) Desenvolver um *software* de curto-circuito para cálculo das matrizes de admitância (Y-Barra) e Thévenin (Z-Barra); e para cálculo das correntes de falta e suas componentes de sequência;

c) Simular cenários de falta em sistemas de diagramas unifilares para teste de validação, com sistemas de pequeno porte;

d) Estabelecer, dentre os cenários de simulação, ao menos 1 sistema com transformadores de ligações Δ-$\curlywedge$ ou Δ-Δ, de modo a ter diferentes situações para o diagrama de sequência zero;

e) Fornecer os resultados do *software* em arquivos de texto (.txt), LaTeX (.tex) ou Web (.html);

f) Comparar os resultados obtidos com o *software* com resultados mostrados em referências bibliográficas como livros e trabalhos acadêmicos;

g) Disponibilizar o executável e o código fonte do *software* SHOT-C em servidor do Google drive da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR);

h) Elaborar um TCC sobre o *software* desenvolvido e os resultados encontrados.

1.3 Justificativa

O estudo de curto-circuito é de grande importância para a formação do engenheiro eletricista, pois curtos-circuitos ocorrem em todas as instalações elétricas, desde sistemas de baixa tensão até sistemas de transmissão com tensões da ordem de centenas de quilovolts.

Considerando os curtos em sistemas de transmissão trifásicos, existem várias possibilidades de faltas que podem ocorrer, sendo estas faltas modeladas matematicamente por vários autores na literatura. Ainda hoje, as faltas são estudadas com o objetivo de melhorar os sistemas de proteção elétrica. Sendo assim, profissionais bem capacitados podem contribuir com mais rapidez na resolução de problemas de interrupção de energia elétrica ocasionados por curtos-circuitos.

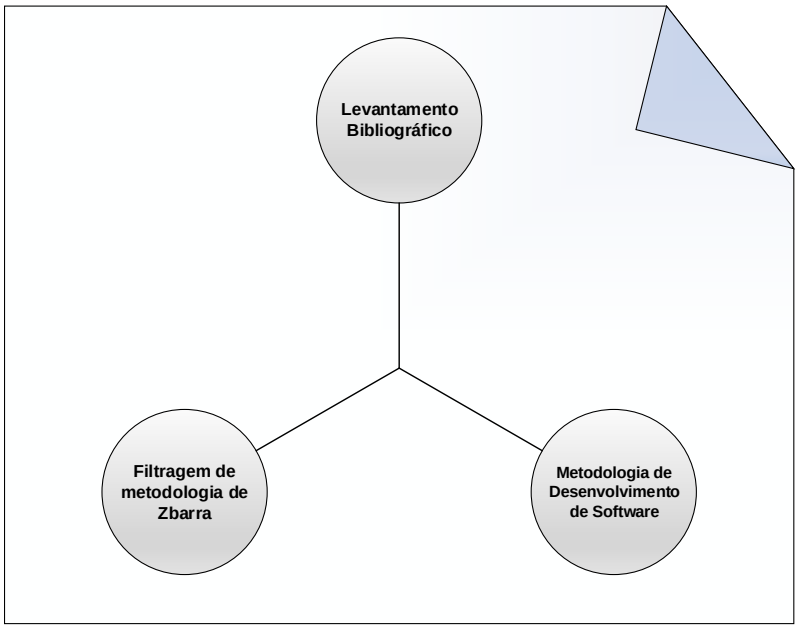
O uso da ferramenta computacional desenvolvida neste TCC poderá agregar valor à comunidade acadêmica, servindo como meio de estudo sobre curtos-circuitos para acadêmicos e futuros engenheiros eletricistas. Outra justificativa, não menos importante, o diferencial deste *software* é o uso da linguagem de programação C e sua respectiva biblioteca gráfica de uso permissível, a biblioteca gráfica IUP - Interface de usuário portátil, do inglês *Portable User Interface* (IUP). Com uso da linguagem C em conjunto com a biblioteca IUP é possível obter um produto comercial com grande poder de novas inserções em futuras versões sem a necessidade de recorrer a tecnologias de uso restrito ou de código aberto. A metodologia para obtenção deste *software* será de livre acesso, o que garante o cunho social de desenvolvimento de novas tecnologias confiáveis, estruturadas e comercializáveis.

1.4 Procedimentos Metodológicos

A metodologia deste TCC é sustentada por um tripé metodológico, como mostrado na Figura 1, ou frontes de sustentação, são eles:

- O Levantamento bibliográfico em livros, artigos, teses/dissertações e Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs) sobre curto-circuito;
- A metodologia de cálculo matricial de equivalentes de Thévenin. Condição necessária para operação computacional de alto volume;
- A metodologia de desenvolvimento de *software*.

Figura 1 – Tripé metodológico do TCC



FONTE: autoria própria (2022)

1.4.1 Levantamento bibliográfico

Em relação ao primeiro item, a primeira sustentação da metodologia deste TCC é o levantamento bibliográfico sobre curto-circuito. Para tanto, as principais obras consultadas para o levantamento sobre o assunto de curto-circuito foram os de Glover, Sarma e Overbye (2011), Glover e Sarma (1994), Kindermann (2007), Kindermann (2018), Stevenson (1986), Anderson (1999), Sato e Freitas (2015) e Bichels (2018), entre outros.

Já em relação ao segundo item, a sustenção da metodologia de resolução matricial de equivalentes de Thévenin, ficou a cargo das obras consultadas de Glover, Sarma e Overbye (2011), Glover e Sarma (1994) e Stevenson (1986). É importante frisar que a referência de Carvalho e Kikuchi (2015) foi tomada como norte de criação do *software* SHOT-C, visto que esta referência auxiliou na implementação de um algoritmo em MATLAB® para o curto-circuito simétrico, seguindo a norma IEC 60909-0:2001 e utilizando a mesma metodologia de obtenção de equivalentes de Thévenin adotada neste TCC. Contudo, Carvalho e Kikuchi (2015) não

apresenta meios de como resolver os curtos-circuitos assimétricos, não apresenta diagramas de sequência zero de transformadores e nem as dificuldades de implementação desses curtos.

E por fim, em relação ao terceiro item, a sustentação da metodologia de desenvolvimento de *software* foi realizada sob a consulta das referências de Trindade e Lucena (2016), Sayão e Leite (2005), Turine e Masiero (1996), Pinto (2011) e Poppendieck e Poppendieck (2003). Em relação às metologias do cálculo matricial e desenvolvimento de *software* é importante evidenciar: a filtragem da metodologia relativo ao primeiro e alguns aspectos metológicos do segundo, como se segue adiante em 1.4.2 e 1.4.3.

1.4.2 Metodologias para cálculo de Z Thévenin

Existem pelo menos três metodologias para se obter os equivalentes de Thévenin de um curto-circuito:

1) Equivalente de Thévenin obtido a partir de diagramas de sequência, método manual;
2) Matriz de impedância de Thévenin (Z-Barra) obtido via matriz inversa da matriz de admitância (Y-Barra);
3) Algoritmo denominado “um passo de cada vez”, tradução de “*one step at a time*” (GLOVER; SARMA, 1994, p. 313). Este algoritmo visa obter a matriz de impedância de Thévenin (Zbarra) atráves dos diagramas de sequência, porém de uma maneira diferenciada, possuindo expressões matemáticas próprias. Não competindo a este TCC se aprofundar no algoritmo.

O *software* SHOT-C adota a segunda metodologia, a inversão da matriz de admitância (Y-Barra), como mecanismo de obtenção dos equivalentes de Thévenin. Assim, em posse das impedâncias de sequência zero, positiva e negativa de Thévenin é possível realizar o cálculo das correntes e tensões de sequência. Já com uso do operador T (e seu inverso) advindo do Teorema de Fortescue é possível obter as correntes e tensões reais. Ademais, o SHOT-C se focará em calcular as matrizes Y-Barra, Z-Barra e as correntes de curto-circuito.

1.4.3 Aspectos metodológicos de desenvolvimento do *software* SHOT-C

Em relação aos aspectos metodológicos do desenvolvimento do *software* de curto-circuito SHOT-C, tem-se que os fundamentos da criação e manutenção do ciclo de vida deste foram regidos por uma gestão de qualidade de desenvolvimento (SAYÃO; LEITE, 2005; TURINE; MASIERO, 1996). O que permite o protótipo do *software* SHOT-C, após sua fase embrionária, evoluir, ganhar versões e atualizações. A gestão de qualidade de forma bem resumida, consistiu em arquivar cada incremento de código fonte (incrementos que visam criar botões, janelas e

rotinas de cálculos), e paralelamente a isso realizar testes desses incrementos para validar sua estabilidade no sistema operacional.

Já na etapa inicial da criação do *software* SHOT-C, a parte mais intuitiva é o levantamento dos requisitos funcionais e não-funcionais (TRINDADE; LUCENA, 2016). Após isso, foram traçados as particularidades, as interfaces gráficas de usuário e suas funcionalidades que foram implementadas no *software* de curto-circuito. Ou seja, traçando-se as particularidades, as restrições (hipóteses de contorno) e explorando-se novos cenários de possibilidades para coleta de dados e de exibição de resultados, buscou-se a objetividade, para garantir segurança no desenvolvimento do *software*. Pois, um *software* por si só é algo abstrato e, se não for delimitado adequadamente, ou se seus requisitos não forem bem estabelecidos, o tornarão totalmente intangível ou inclusive uma frustração para o usuário final.

Sendo assim, após se realizar a revisão bibliográfica, levantar os requisitos e obter o *software* por metodologia ágil de desenvolvimento de *software* (programação de código fonte por demanda de versões com capacidade de flexibilização de requisitos) (TRINDADE; LUCENA, 2016; POPPENDIECK; POPPENDIECK, 2003), foram feitos testes de rotina e baterias de testes finais sob o protótipo criado.

1.5 Estrutura do trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é dividido nos seguintes capítulos:

O Capítulo 1 descreveu-se o tema do trabalho, a delimitação do tema, os objetivos e as etapas para se alcançar os objetivos específicas, bem como a justificativa para esse estudo e a metodologia utilizada para investigação.

No Capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o cálculo de curto-circuito em máquinas síncronas, transformadores de dois enrolamentos e linhas elétricas curtas e médias. Além disso, considera-se o sistema elétrico trifásico e o uso de transformadores de núcleo envolvente e/ou núcleo envolvido nos sistemas elétricos de potência. Sendo assim, também realiza-se uma revisão bibliográfica sobre a literatura das componentes de sequência e os diagramas de sequência zero para os transformadores trifásicos de dois enrolamentos.

No Capítulo 3 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a obtenção da matriz de admitância (Y-Barra), a inversão dessa matriz para ordens de pelo menos 10x10 e como utilizar a matriz obtida pela inversão, ou seja, a matriz de Thévenin. Dessa forma, nesse capítulo foram apresentadas as fórmulas e sistemas matriciais para obtenção das correntes e tensões de sequência.

No Capítulo 4 apresenta-se o desenvolvimento do *software* proposto neste trabalho. Apresenta-se, também, os principais passos de concepção, fluxograma do algoritmo e detalhes de métodos que viabilizaram a criação de rotinas de recursividade.

No Capítulo 5 apresenta-se os diagramas unifilares de teste propostos confrontando com os resultados dos exemplos das referências. Nesse capítulo foi demonstrado o cruzamento

e o entrelaçamento dos conceitos fundamentados, tais como da matriz de Thévenin (Zbarra) com as correntes de sequência, além do Teorema de Fortescue e as correntes reais.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e o parecer final sobre o *software* SHOT-C.

2 CURTOS-CIRCUITOS

2.1 Introdução

Para estudar sobre curtos-circuitos é necessário usar o conceito do valor **p**or **u**nidade (pu) como pré-requisito, bem como a representação em "pu" do sistema de potência completo (conexão entre geradores, transformadores, linhas de transmissão e cargas). Feito isso, o estudo de curtos-circuitos simétricos e assimétricos se dá por duas etapas:

- A primeira etapa consiste em estabelecer um sistema matemático de base própria chamado de componentes simétricas, análogo às bases de espaços vetoriais. Esse sistema é baseado no Teorema de Fortescue que é um método matemático capaz de decompor as correntes ou tensões reais de um sistema de n fases, polifásico, desequilibrado, em um sistema de correntes ou tensões de um espaço fasorial de n componentes equilibradas. A primeira demonstração detalhada desse teorema é impecável, dado sua qualidade e tangibilidade, embora já se tenha passado mais de 100 anos, uma vez que o artigo de Fortescue foi publicado no ano 1918 (FORTESCUE, 1918).

  Com esse teorema os sistemas fasoriais desequilibrados de um curto-circuito passam a ser tratados em um espaço fasorial, intercambiável, passível de solução. Sendo assim, realizando-se as devidas conversões após a solução, é possível obter os valores reais do sistema desequilibrado.

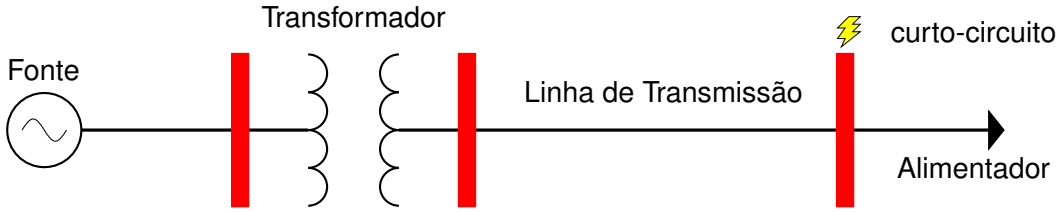
- A segunda etapa consiste em compreender a simplificação dos transformadores em diagramas de circuito equivalente por fase da sequência zero, obtendo-se tabelas e/ou blocos-esquemáticos dos transformadores (STEVENSON, 1978, p. 267). É de suma importância entender a obtenção desses blocos, pois a partir deles é construído os diagramas de sequência que facilitam os cálculos dos curtos-circuitos assimétricos, e foram esses blocos-esquemáticos os elementos mais impactantes na criação do código-fonte do *software* SHOT-C.

2.2 Diagrama de impedância de curto-circuito

O ponto de partida fundamental para conceituação do que é um curto-circuito no SEP, consiste estabelecer algumas simplificações críticas, em virtude da magnitude acentuada dos valores envolvidos.

Para entender melhor o que são e quais são essas simplificações, e o referencial adotado, é dado um exemplo na Figura 2, discutido por (KINDERMANN, 2007, p. 7).

Figura 2 – Diagrama unifilar em curto-circuito trifásico



FONTE: adaptado de (KINDERMANN, 2007, p. 8)

A Figura 2 representa um exemplo simples entre a transmissão e a distribuição de energia elétrica de uma fonte até uma carga praticamente resistiva, no caso sendo representada por um alimentador de distribuição, que pode representar um conjunto de consumidores conglomerados, exemplo de uma cidade, bairros ou loteamentos. No barramento representado por um curto-circuito tem-se uma falta trifásica nos terminais da impedância equivalente do alimentador. Considerando-se a modelagem dos elementos do SEP para curto-circuito, tem-se que em regime permanente, antes de ocorrer o curto, a corrente de carga é equilibrada e obtida pela Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), dado pela Expressão 2.1:

$$-\dot{E}_{fonte} + jX_{equivalente} \cdot \dot{I}_{carga} + R_{carga} \cdot \dot{I}_{carga} = 0 \tag{2.1}$$

Onde:

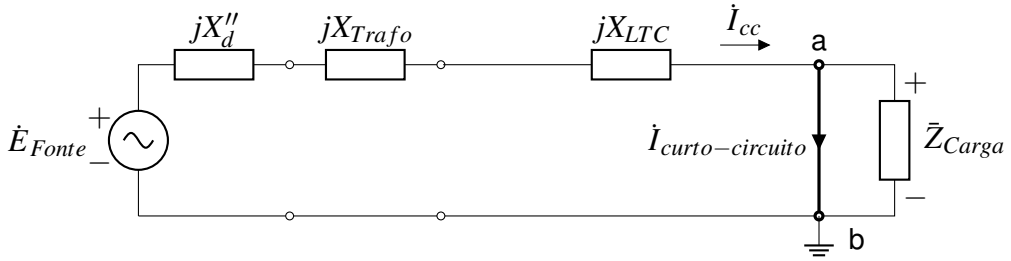
- $X_{equivalente} = X_{Fonte} + X_{Trafo} + X_{LT}$, o somatório da reatância equivalente do unifilar;
- X_{Fonte}, a reatância subtransitória do gerador síncrono;
- X_{Trafo}, a reatância do transformador;
- X_{LT}, a reatância da linha de transmissão;
- $\dot{E}_{fonte}$, a tensão interna eletromotriz do gerador;
- R_{carga}, o equivalente admitido do alimentador;
- $\dot{I}_{carga}$, a corrente do alimentador antes do curto-circuito.

Como a resistência do Alimentador é muito maior que a parcela reativa equivalente, essa parcela pode ser desprezada, obtendo-se a Equação 2.2 como se segue. Nesse caso tem-se que a tensão da fonte estará praticamente em fase com a tensão da carga.

$$\dot{I}_{carga} = \frac{\dot{E}_{fonte}}{R_{carga}} \qquad \text{(antes do curto-circuito)} \tag{2.2}$$

Para se analisar os cálculos de curto-circuito, e o referencial adotado, é necessário realizar as devidas considerações a respeito das simplificações adotadas para os elementos do diagrama unifilar, aplicados sobre o diagrama de impedância, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de impedância em curto-circuito trifásico



FONTE: autoria própria (2022)

A Figura 3 mostra o diagrama de impedância equivalente por fase do circuito apresentado na Figura 2, na presença de um curto-circuito trifásico. Este tipo de curto-circuito é apenas um dos tipos conhecidos na literatura, é um curto-circuito onde todas as correntes são equilibradas. A representação do terra significa que o curto-circuito trifásico é equivalente ao curto-circuito trifásico-terra.

2.2.1 Simplificações adaptativas para cálculo de curto-circuito

Ainda considerando a modelagem e as simplificações para curto-circuito dos elementos do SEP, tem-se o circuito de impedâncias da Figura 3, no qual o gerador é representado pelo seu modelo clássico como uma fonte de tensão interna $\dot{E}_{Fonte}$ em série com a reatância interna, que no instante inicial do curto assume o valor subtransitório ou, na ausência desse, atribui-se o valor transitório, no caso de máquinas síncronas sem enrolamento amortecedor no rotor.

O transformador é representado apenas por sua reatância equivalente série reativa, chamada aqui de X_{Trafo}, considerando-se um curto-circuito trifásico. A Linha de Transmissão (LT) é representada pelo modelo de Linha de Transmissão Curta (LTC) e, nesse caso, apenas a reatância série da linha é considerada.

A Figura 3 mostra a LT como sendo uma LTC (linha de transmissão curta), mas para curto-circuito também pode-se considerar como sendo uma Linha de Transmissão Média (LTM). Recomenda-se sempre admitir a LTC e a LTM em elevadas tensões para estudo de curto-circuito com impedâncias sem a parte real, visto que ambas possuem o valor de resistência significativo às baixas tensões. Considerando a fundamentação das simplificações da máquina síncrona, dos transformadores e das linhas de transmissão, tem-se que a corrente de curto-circuito trifásico é dada pela Equação 2.3:

$$\dot{I}_{curto} = \frac{\dot{E}_{Fonte}}{j \cdot (X''_d + X_{Trafo} + X_{LTC})} \tag{2.3}$$

Onde:

- X''_d, a reatância subtransitória de eixo direto;
- X_{Trafo}, a reatância do transformador;
- X_{LTC}, a reatância da linha de transmissão curta;
- $\dot{E}_{fonte}$, a tensão interna eletromotriz do gerador;
- $\dot{I}_{curto}$, a corrente na barra do Alimentador após o curto-circuito trifásico.

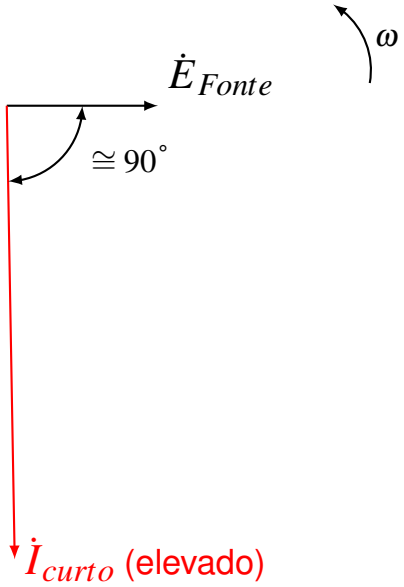
O somatório das reatâncias $X''_d + X_{Trafo} + X_{LTC}$, que é a reatância equivalente X_{eq}, nos fornece um valor elevado de corrente, muito superior à corrente de regime permanente calculada pela Equação 2.2 (ANDERSON, 1999, p. 152-155), como indicado pela Expressão 2.4.

$$\dot{I}_{curto} >>> \dot{I}_{carga} \tag{2.4}$$

Com respeito a referência angular adotada, pode-se gerar uma possível confusão ou falsa interpretação em relação ao ângulo de 90° gerado pela defasagem de tensão e corrente da Equação 2.3, dependendo do autor o ângulo de 90° pode ser atribuído à tensão, assim a corrente de curto-circuito resulta, após cálculo, no ângulo de 0°, preservando a defasagem. Por exemplo, Kindermann (2007, p. 208) atribui à tensão interna um ângulo de zero graus para dedução das equações modulares do Sistema Radial Multiaterrado, já por outro lado, Kindermann (2007, p. 129) atribui à tensão interna um ângulo de 90° para um gerador síncrono isolado.

Como dito anteriormente, a defasagem é preservada, então não existe dupla interpretação. Assim, ao se atribuir uma referência angular de 0° para tensão interna tem-se uma corrente defasada aproximadamente de 90° dessa tensão, como mostrado na Figura 4. A defasagem não é exata porque considera-se que o equivalente série depende tanto da reatância equivalente série como da resistência equivalente série, esta desprezada.

Figura 4 – Diagramas fasorial do curto-circuito.

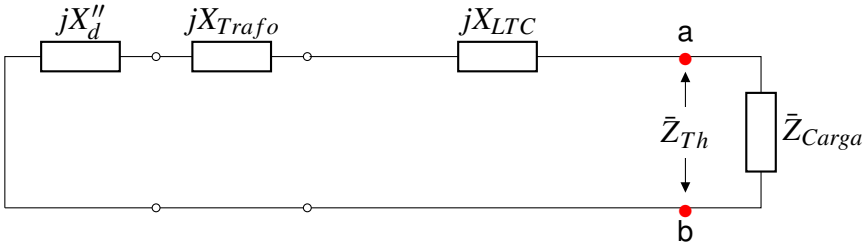


FONTE: adaptado de Kindermann (2007, p. 9)

Por fim, a impedância equivalente de curto-circuito trifásico é a impedância de Thévenin vista dos pontos **a-b** da Figura 3. No caso, o equivalente de Thévenin é o paralelo da reatância equivalente com a impedância da carga, estando a fonte curto-circuitada, como mostra a Figura 5. A impedância vista em **a-b** é dada pela Equação 2.5:

$$\bar{Z}_{ab} = \frac{jX_{eq}.\bar{Z}_{carga}}{jX_{eq}+\bar{Z}_{carga}} \qquad \text{onde, } \bar{Z}_{ab} = \bar{Z}_{Thevenin} \tag{2.5}$$

Figura 5 – Equivalente de Thévenin em curto-circuito trifásico



FONTE: autoria própria (2022)

Após se discutir as componentes simétricas, nas próximas seções é que ficará claro o uso da impedância de Thévenin. Contudo, ainda será abordado a fundamentação sobre a matriz de admitância (Y-Barra) e a matriz de Thévenin (Z-Barra) para n barras, dando suporte necessário para se compreender as principais questões dos objetivos específicos deste TCC.

2.3 Componentes simétricas

A essência das componentes simétricas também pode ser compreendida através do estudo das máquinas polifásicas, que é amplamente discutida pelo meio acadêmico, quando se realiza a decomposição da onda de força magnetomotriz (FMM) de um enrolamento polifásico.

Por exemplo, a partir de uma máquina de indução trifásica, tem-se que a decomposição da FMM gera três pares de ondas progressivas, onde cada par de onda progressiva é composta por uma progressiva positiva e uma progressiva negativa, a positiva gira no sentido anti-horário enquanto que a negativa gira no sentido horário. Como as correntes do sistema trifásico para uma máquina de indução trifásica estão defasadas de 120°, ou seja, 0°, 120° e 240°, tem-se que a decomposição da FMM terá três ondas progressivas positivas e três ondas progressivas negativas, enquanto que a soma das positivas se sobrepõem e dão origem ao giro da máquina de indução trifásica, a soma das negativas resultam em zero (UMANS, 2014, p. 528).

Ainda com respeito a essas ondas, a positiva é chamada de sequência positiva e a negativa é chamada de sequência negativa (UMANS, 2014, p. 529). Baseando-se nessa teoria criada no século XX, o Dr. C.L. Fortescue (1876-1936) conseguiu generalizar a teoria em uma formulação analítica muito poderosa propondo a decomposição de qualquer sistema de "n" fases desequilibradas nas suas respectivas componentes simétricas equilibradas (KINDERMANN, 2007, p. 38). E é através dessa formulação analítica que a partir de agora o estudo de curto-circuito será tratado.

2.3.1 Teorema de Fortescue

O teorema demonstrado pelo Engenheiro Eletricista Charles LeGeyt Fortescue em 1918 (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2011, p. 419), intitulado "Método de componentes simétricas aplicado a solução de circuitos polifásicos", consiste no sistema analítico geral de "n" fasores equilibrados representando um sistema desequilibrado de "n" fasores (KINDERMANN, 2007, p. 38), dado pela Equação 2.6:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{b0} \\ \dot{V}_{c0} \\ \vdots \\ \dot{V}_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{b1} \\ \dot{V}_{c1} \\ \vdots \\ \dot{V}_{n1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_{b2} \\ \dot{V}_{c2} \\ \vdots \\ \dot{V}_{n2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{a3} \\ \dot{V}_{b3} \\ \dot{V}_{c3} \\ \vdots \\ \dot{V}_{n3} \end{bmatrix} + \ldots + \begin{bmatrix} \dot{V}_{ai} \\ \dot{V}_{bi} \\ \dot{V}_{ci} \\ \vdots \\ \dot{V}_{ni} \end{bmatrix} + \ldots + \begin{bmatrix} \dot{V}_{a(n-1)} \\ \dot{V}_{b(n-1)} \\ \dot{V}_{c(n-1)} \\ \vdots \\ \dot{V}_{n(n-1)} \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Ou seja,

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \\ \vdots \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} = \Big[\text{Seq. 0}\Big] + \Big[\text{Seq. 1}\Big] + \Big[\text{Seq. 2}\Big] + \Big[\text{Seq. 3}\Big] + \ldots + \Big[\text{Seq. i}\Big] + \ldots + \Big[\text{Seq. n-1}\Big]$$

Considerando um sistema trifásico desequilibrado de tensões fasoriais $\dot{V}_a$, $\dot{V}_b$ e $\dot{V}_c$, então é possível obter três sistemas trifásicos equilibrados, um de sequência zero ($\dot{V}_{a0}$, $\dot{V}_{b0}$ e $\dot{V}_{c0}$), um de sequência positiva ($\dot{V}_{a1}$, $\dot{V}_{b1}$ e $\dot{V}_{c1}$) e um de sequência negativa ($\dot{V}_{a2}$, $\dot{V}_{b2}$ e $\dot{V}_{c2}$) (STEVENSON, 1978, p. 245), como mostrado matricialmente pela Equação 2.7:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{b0} \\ \dot{V}_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{b1} \\ \dot{V}_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_{b2} \\ \dot{V}_{c2} \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

De acordo com Fortescue (1918, p. 632) a defasagem θ_k dos fasores consecutivos do sistema de sequência k-ésima é obtida pela Equação 2.8:

$$\theta_k = k \cdot \frac{2\pi}{n} \tag{2.8}$$

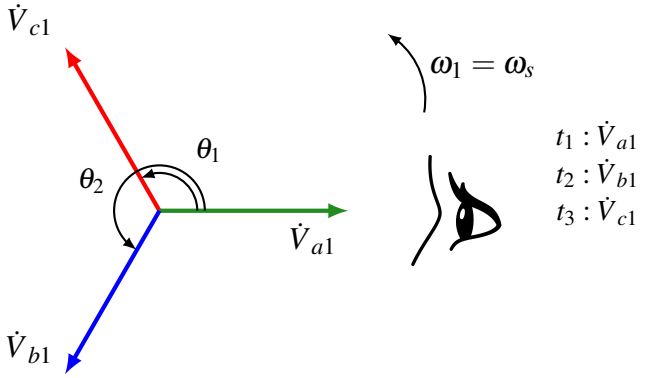
Assim, por exemplo, os fasores equilibrados de sequência negativa de um sistema trifásico desequilibrado, onde $k = n - 1 = 2$, são obtidos pela Expressão 2.9:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_{b2} \\ \dot{V}_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a2} \angle 2 \cdot \frac{0\pi}{3} \\ V_{b2} \angle 2 \cdot \frac{1\pi}{3} \\ V_{c2} \angle 2 \cdot \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a2} \angle 0^\circ \\ V_{b2} \angle 120^\circ \\ V_{c2} \angle 240^\circ \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

2.3.1.1 Diagramas fasoriais de sequência

A partir de agora o foco será a discussão sobre o sistema 3ϕ desequilibrado. O primeiro sistema equilibrado obtido da decomposição desse sistema desequilibrado é a sequência positiva como mostrado na Figura 6, que consiste no agrupamento de três fasores $a1$, $b1$, $c1$, obtidos da observação a partir do ângulo zero e considerando-se a defasagem θ_k e a velocidade síncrona ω_s (no sentido anti-horário).

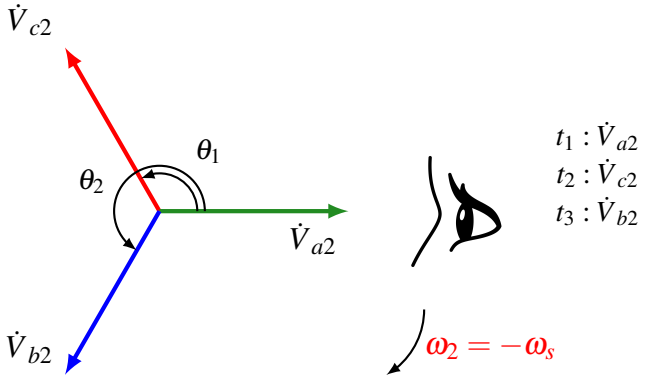
Figura 6 – Diagrama fasorial de sequência positiva.



FONTE: autoria própria (2022)

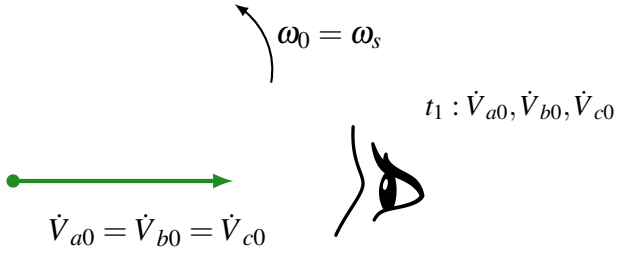
A sequência negativa real (por causa da velocidade síncrona horária) leva-se em consideração a velocidade igual à da sequência positiva com sinal trocado (KINDERMANN, 2007, p. 42), enquanto que a sequência zero não possui defasamento entre os fasores, como mostrado nas Figuras 7 e 8. Note que as cores dos fasores da sequência positiva e o da sequência negativa real coincidem em suas direções espaciais, mas os fasores giram em diferentes sentidos. Na seção 2.3.1.3 é demonstrado como realizar a adaptação da sequência negativa real para que passe a ser chamada somente de sequência negativa, nesse momento as cores dos fasores das sequências positiva e negativa não mais se coincidirão na mesma direção do espaço.

Figura 7 – Diagrama fasorial de sequência negativa – Real.



FONTE: autoria própria (2022)

Figura 8 – Diagrama fasorial de sequência zero.



FONTE: autoria própria (2022)

2.3.1.2 Operador rotacional a

A representação do fasor unitário de fase de 120 graus, $\dot{a} = 1\angle 120^\circ$ (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2011, p. 429), é conhecido como **operador rotacional** (BICHELS, 2018, p. 163). A notação dos ângulos de 120° e 240° nos diagramas fasoriais de sequências positiva e negativa obedecem a Equação 2.8. Assim, tem-se as relações 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13.

$$\theta_1 = 120^\circ \tag{2.10}$$

$$\dot{a} = 1\angle\theta_1 = 1\angle 120^\circ \tag{2.11}$$

$$\theta_2 = 240^\circ \tag{2.12}$$

$$\dot{a}^2 = 1\angle\theta_2 = 1\angle 240^\circ \tag{2.13}$$

2.3.1.3 Representação analítica

Considerando os diagramas fasoriais das Figuras 7 a 8 e o operador rotacional $\dot{a}$, tem-se que o teorema de Fortescue trifásico pode ser representado matricialmente com destaque para a matriz **T**, uma matriz quadrada 3x3 denominada de **matriz de transformação das componentes de sequência nos fasores originais** do sistema desbalanceado.

Inicialmente verifica-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} \\ \dot{V}_{b0} + \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2} \\ \dot{V}_{c0} + \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

Dessa forma, aplicando-se o operador rotacional $\dot{a}$ tem-se:

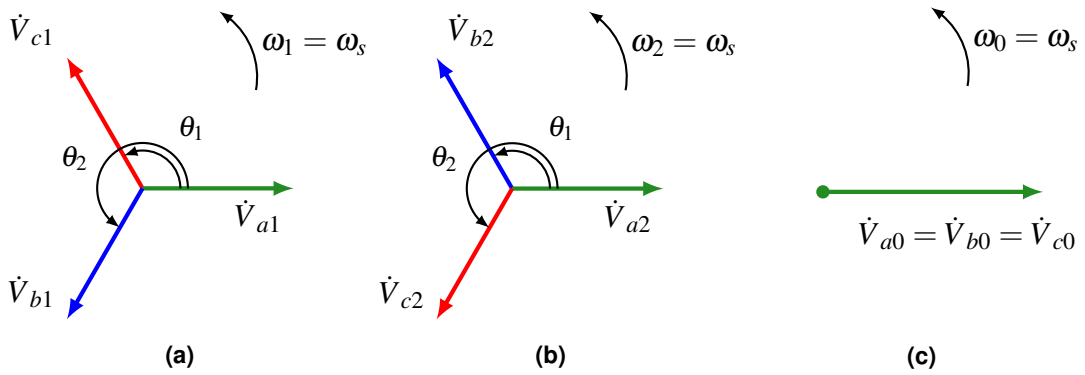
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

A matriz de transformação em componentes simétricas **T** é definida por:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Assim, os diagramas fasoriais das componentes simétricas, em resumo, são mostrados na Figura 9, com a velocidade de sequência negativa adaptada ao Teorema de Fortescue.

Figura 9 – Diagramas fasoriais de componentes simétricas – adaptado: (a) Seq. Positiva (b) Seq. Negativa (c) Seq. Zero.



FONTE: autoria própria (2022)

Ou seja, a Figura 9(b) mostra a adaptação da sequência negativa real, esta mostrada na Figura 7, para a sequência negativa.

2.3.1.4 A matriz inversa de transformação

De acordo com Glover e Sarma (1994, p. 52), a matriz inversa T^{-1} é definida pela Expressão 2.17:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Essa matriz T^{-1} serve para realizar uma operação inversa, ou seja, ao invés de se obter os valores de tensões ou correntes reais, obtém-se os valores das componentes simétricas. Isso tem três finalidades principais: a primeira permite calcular a corrente de sequência zero

atrelada a corrente de neutro; a segunda permite exibir os diagramas fasoriais de sequências equilibradas para um sistema desequilibrado; e a última permite obter os circuitos de impedância das componentes simétricas.

2.3.1.5 Corrente de neutro

As componentes simétricas podem ser aplicadas sobre as tensões de fase, por meio dos fasores $\dot{V}a0$, $\dot{V}a1$ e $\dot{V}a2$, como mostrado anteriormente, e também podem ser aplicadas sobre as correntes de fase, através dos fasores $\dot{I}a0$, $\dot{I}a1$ e $\dot{I}a2$ (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2011, p. 430) como mostrado na Expressão 2.18.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

Como consequência, tem-se que para o sistema trifásico, em particular a sequência zero, possui uma interpretação física com aplicação direta sobre sistemas aterrados e sobre Transformadores de Aterramento – TAT, pois as correntes de fase quando estão desequilibradas dão um somatório não nulo. Logo, tem-se que a corrente de sequência zero é não nula e uma vez havendo aterramento, como por exemplo, em um sistema estrela-aterrado, a corrente de sequência zero é conduzida à terra.

Essa corrente de sequência zero não é exatamente a corrente de neutro, já que a corrente de neutro tem o mesmo papel em um sistema estrela-aterrado, a diferença consiste no fator $\frac{1}{3}$ advindo da matriz inversa de transformação de componentes simétricas. Ou seja, aplicando-se a matriz T^{-1} sobre a Expressão 2.18 e explicitando-se $\dot{I}_{a0}$, por meio da operação "linha $\times$ coluna", tem-se a Expressão 2.19:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_{neutro} \tag{2.19}$$

2.4 Circuitos de sequência das componentes simétricas

Para obtenção das correntes de curto-circuito via componentes simétricas é necessário obter os circuitos de sequência. Esses circuitos surgem das condições iniciais de operação dos elementos do SEP em curto-circuito. Para obtenção dos circuitos de sequência, tomando a máquina síncrona como referência, é utilizado a matriz inversa de transformação T^{-1}, sob as condicionais de curto-circuito. Ou seja, com uso da matriz inversa T^{-1} é obtido as expressões condicionais de sequência para montagem dos circuitos de sequência.

2.4.1 Tensão de falta do curto-circuito

A tensão interna de uma máquina síncrona, $\dot{E}$, é a fonte que mantêm um curto-circuito nos terminais dessa máquina, seja em curtos simétrico ou assimétricos. Já um curto-circuito em um sistema elétrico de potência em anel, um SEP em anel, a fonte fica dispersa ao fluxo e às tensões das barras. Contudo, o modelo adotado para máquina síncrona pode ser reutilizado, trocando-se a tensão interna, $\dot{E}$, pela tensão de falta, $\dot{V}_F$, no ponto da falta (STEVENSON, 1978, p. 284). Por isso, a apresentação dos blocos de sequência e circuitos de sequência inicia-se pela máquina síncrona, como se segue na próxima seção, a Seção 2.4.2. Dessa forma, cabe descatar a formalização da tensão de falta pela Expressão 2.20:

$$\dot{V}_F = \text{tensão de falta na barra ou no ponto de falta} \tag{2.20}$$

2.4.2 Circuitos de sequência da máquina síncrona

Como dito anteriormente, na seção 2.4, os circuitos de sequência para as máquinas síncronas são obtidos partindo-se das condições iniciais da máquina em curto-circuito e operando-as sobre a matriz inversa T^{-1}. Para tanto utiliza-se:

- T^{-1} com as tensões reais e de sequência para obtenção dos circuitos de sequência dos curtos-circuitos simétricos e assimétricos bifásicos. E por consequência, a obtenção das correntes de sequência pelo equivalente de Thévenin (GLOVER; SARMA, 1994, p. 358). Ademais, calcula-se as correntes e tensões reais de curto-circuito através do Teorema de Fortescue para o sistema trifásico;
- T^{-1} com as correntes reais e de sequência para obtenção do modelo de sequência do curto-circuito assimétrico monofásico. E por consequência, a obtenção das correntes de sequência pelo equivalente de Thévenin (KINDERMANN, 2007, p. 131). Ademais, calcula-se as correntes e tensões de curto-circuito monofásico através do Teorma de Fortescue para o sistema trifásico.

A seguir é apresentado, de forma breve, os blocos de sequência para os curtos-circuitos em uma máquina síncrona. Posteriormente será mostrado os blocos equivalentes de sequência para os transformadores e para as linhas de transmissão finalizando-se assim a fundamentação teórica base para concepção do *software* de curto-circuito. Contudo, será requerido a utilização genérica adotada por Glover e Sarma (1994, p. 358), visto que aqui nesta seção é apenas admitido o equivalente de Thévenin nos terminais da máquina síncrona, já na generalização é admitido que os circuitos de sequência são obtidos em qualquer barra do SEP e em qualquer combinação. Para tanto, Glover e Sarma (1994, p. 357) utiliza de circuitos de sequência em modo *Rake*, isso será discutido em mais detalhes no final deste capítulo, na seção 2.4.5.

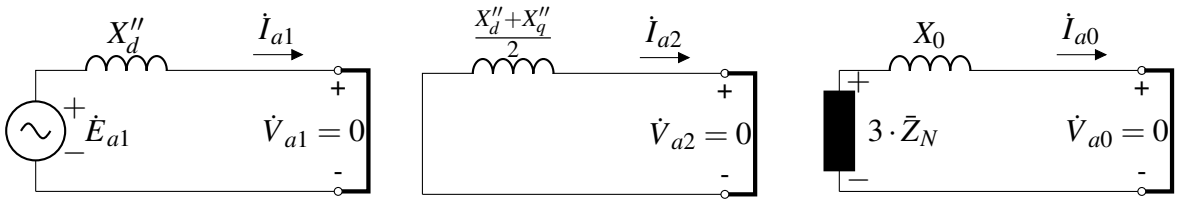
2.4.2.1 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 3ϕ

Os circuitos de sequência de um curto-circuito simétrico nos terminais de um gerador síncrono são apresentados neste item. Cabe destacar que, de acordo com Kindermann (2007, p. 75), a modelagem do motor síncrono é a mesma do gerador síncrono. Assim, operando a matriz inversa T^{-1} sob as condições iniciais de **curto-circuito** 3ϕ nos terminais do gerador, considerando as tensões reais nulas na Equação 2.21, obtêm-se os circuitos de sequência mostrados nas Figuras 10(a), 10(b) e 10(c).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a = 0 \\ \dot{V}_b = 0 \\ \dot{V}_c = 0 \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

É importante enfatizar que ao se utilizar a matriz inversa, o resultado das componentes simétricas se darão com referência a uma fase. Assim os circuitos desse curto-circuito são mostrados na Figura 10.

Figura 10 – Circuitos de sequência da máquina síncrona em curto trifásico.



(a) Sequência Positiva (Bloco 1)

(b) Sequência Negativa (Bloco 2)

(c) Sequência Zero (Bloco 0)

FONTE: adaptado de Kindermann (2007)

O único bloco ativo (com circulação de corrente) é o de sequência positiva, e estando os demais inativos conclui-se que se trata de um curto-circuito equilibrado.

De acordo com a modelagem das máquinas síncronas para curto-circuito, são consideradas as reatâncias subtransitória, transitória e de regime permanente, X''_d, X'_d e X_d, respectivamente. De acordo com Kindermann (2007, p.65) utiliza-se a reatância subtransitória para curtos-circuitos a qual produz o maior valor de corrente de curto-circuito, já que entre as três, é a de menor valor. A consequência disso é o ajuste do disjuntor de proteção ficar ajustado para um valor maior, dando maior segurança ao sistema. A reatância de sequência negativa é obtida pela média aritmética das reatâncias de eixo direto e eixo em quadratura (CASTRO, 2015, p. 25), enquanto que a reatância de sequência zero é obtida via ensaio (KINDERMANN, 2007, p.68-69).

Como a tensão interna e a reatância subtransitória são valores que estão presente no único circuito ativo de curto-circuito trifásico resta calcular a corrente de sequência positiva

do curto-circuito trifásico, como segue pela Equação 2.22. Por último, cabe destacar que a única reatância, a X_{a1}, é a impedância equivalente de Thévenin para o curto-circuito trifásico, $\bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE}$.

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{a1}}{j \cdot X_{a1}} \tag{2.22}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a1}$, a corrente fasorial de curto-circuito trifásico de sequência positiva, da fase a;
- $\dot{E}_{a1}$, a tensão interna fasorial de sequência positiva do gerador à vazio, da fase a;
- $j \cdot X_{a1} = j \cdot X_d'' = \bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE}$, o equivalente de Thévenin de sequência positiva nos terminais do gerador síncrono à vazio para o curto-circuito trifásico, da fase a.

2.4.2.2 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 2ϕ

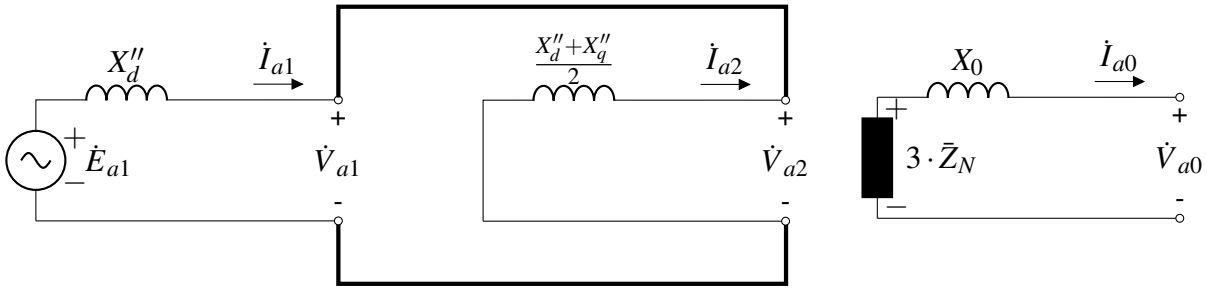
Operando-se a matriz inversa T^{-1}, sob as condições iniciais de **curto-circuito** 2ϕ nos terminais do gerador, obtêm-se uma combinação dos circuitos de sequência mostrados na Figura 10. O Bloco de sequência zero é descartado por não haver circulação de corrente de sequência.

Por fim, as condições iniciais são aplicadas às tensões reais na matriz coluna da Equação 2.23. O circuito final terá somente dois blocos ativos, mas alimentados somente pela tensão interna de sequência positiva. A partir da matriz inversa T^{-1}, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{\mathbf{V}}_\mathbf{b} \\ \dot{\mathbf{V}}_\mathbf{b} \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

Considerando a Equação 2.23 sob as condições iniciais do curto bifásico, ou seja, $\dot{I}_a = 0$, $\dot{V}_b = \dot{V}_c$ e $\dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$, tem-se que $\dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2}$, o que resulta na Figura 11.

Figura 11 – Circuitos de sequência da máquina síncrona em curto bifásico: conexão paralela.



FONTE: adaptado de Kindermann (2018, p. 147)

A corrente de sequência positiva pode ser calculada com soma das reatâncias de sequências positiva e negativa (respectivamente X_{a1} e X_{a2}), como mostrado na Equação 2.24. No caso de um gerador síncrono de rotor cilíndrico, as reatâncias X_{a1} e X_{a2} são iguais, ou seja, X_{a1} = X_{a2} (KINDERMANN, 2007, p. 145). Por último, cabe destacar que a soma das reatâncias, $j \cdot X_{a1} + j \cdot X_{a2}$, é a impedância equivalente de Thévenin para o curto-circuito bifásico, $\bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE}$.

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{a1}}{j \cdot X_{a1} + j \cdot X_{a2}} \tag{2.24}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a1}$, a corrente fasorial de curto-circuito bifásico de sequência positiva, da fase a;
- $\dot{E}_{a1}$, a tensão interna fasorial de sequência positiva do gerador à vazio, da fase a;
- $j \cdot X_{a1}$ = $j \cdot X_d''$, a reatância de sequência positiva para o curto-circuito bifásico, da fase a;
- $jX_{a2} = j\frac{X_d'' + X_q''}{2}$, a reatância de sequência negativa para o curto-circuito bifásico (fase a);
- $j \cdot X_{a1}$ + $j \cdot X_{a2}$ = $\bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE}$, o equivalente de Thévenin de sequência positiva nos terminais do gerador síncrono à vazio para o curto-circuito bifásico, da fase a.

Note que a soma do denominador da Equação 2.24 é o equivalente de Thévenin, visto pelos terminais do gerador síncrono. Como discutido anteriormente, o modelo de sequência para um curto-circuito bifásico também é válido para um SEP, contudo, requerendo-se a modificação da tensão interna da máquina, E_a, pela tensão de falta, V_f.

Ademais, a corrente de sequência negativa existe, de acordo com a Figura 11, e essa é oposta à corrente de sequência positiva (STEVENSON, 1978, p. 277). Como mostrado na Equação 2.25:

$$\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1} \tag{2.25}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a2}$, a corrente fasorial de sequência negativa, da fase a, para curto-circuito bifásico.

2.4.2.3 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 2ϕ-terra

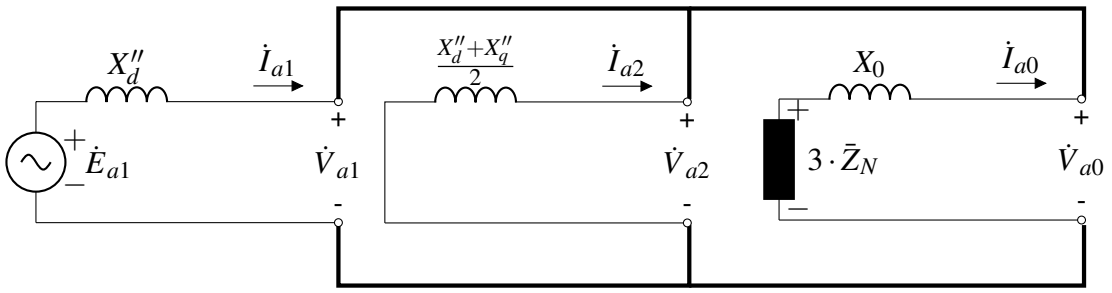
Operando-se a matriz inversa T^{-1}, sob as condições iniciais de **curto-circuito 2ϕ-terra** nos terminais do gerador, obtêm-se uma combinação dos blocos de sequência, como mostrado na Figura 12 (STEVENSON, 1978, p. 280).

Por fim, as condições iniciais são aplicadas às tensões reais na matriz coluna na Equação 2.26. O circuito equivalente monofásico dos blocos ou modelos de sequência terá os três blocos ativos, mas alimentados somente pela tensão interna de sequência positiva. A partir da matriz inversa T^{-1}, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b = 0 \\ \dot{V}_c = 0 \end{bmatrix} \tag{2.26}$$

Considerando a Equação 2.26 sob as condições iniciais do curto bifásico-terra, ou seja, $\dot{I}_a = 0$ e $\dot{V}_b = \dot{V}_c = 0$, tem-se $\dot{V}_{a0} = \dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2}$, o que resulta na Figura 12.

Figura 12 – Circuitos de sequência da máquina síncrona em curto bifásico-terra: conexão paralela.



FONTE: adaptado de Stevenson (1978, p. 280)

A corrente de sequência positiva pode ser calculada como mostrado na Equação 2.27. Note que o denominador é o equivalente de Thévenin, $\bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE}$, visto dos terminais do gerador síncrono para o curto-circuito bifásico-terra. Para a generalização no SEP, é necessário considerar a tensão de falta, $\dot{V}_f$, no lugar da tensão interna do gerador, $\dot{E}_a$ (GLOVER; SARMA, 1994, p. 358).

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{a1}}{j{\cdot}X_{a1} + j{\cdot}X_{a2} || (j{\cdot}3{\cdot}Z_N + j{\cdot}X_{a0})} \tag{2.27}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a1}$, a corrente fasorial de curto-circuito bifásico-terra de sequência positiva, da fase a;
- $\dot{E}_{a1}$, a tensão interna fasorial de sequência positiva do gerador síncrono à vazio, da fase a;
- $\bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE} = j \cdot X_{a1} + j \cdot X_{a2} || (j \cdot 3 \cdot Z_N + j \cdot X_{a0})$, o equivalente de Thévenin de sequência positiva do gerador síncrono à vazio em seus terminais para o curto-circuito bifásico-terra, da fase a;
- $j \cdot X_{a0}$, a reatância de sequência zero para o curto-circuito bifásico-terra, da fase a;

- $j \cdot X_{a1}$, a reatância de sequência positiva para o curto-circuito bifásico-terra, da fase a;
- $j \cdot X_{a2}$, a reatância de sequência negativa para o curto-circuito bifásico-terra, da fase a;
- $j \cdot 3 \cdot Z_N$, a impedância equivalente de aterramento, para a conexão do ponto de neutro no enrolamento estrela (Y-at), do curto-circuito bifásico-terra, da fase a.

Ademais, as correntes das sequências negativa e zero existem, de acordo com a Figura 12, e podem ser obtidas usando o divisor de correntes e a Lei de Kirchhoff das Tensões (KINDERMANN, 2018, p. 152), ou simplesmente pelas Equações 2.28 e 2.29 (BICHELS, 2018, p. 292). Cabe destacar, ainda, que a generalização das Expressões 2.28 e 2.29 é feita por Glover e Sarma (1994, p. 358) – como é discutido na Seção 2.4.5.

$$\dot{I}_{a2} = -\frac{\dot{V}_{a1}}{\bar{Z}_{th-2}^{BLOCO-2}} \tag{2.28}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a2}$, a corrente fasorial de sequência negativa da fase a;
- $\dot{V}_{a1}$, a tensão fasorial de $\dot{V}_{a2}$ (tensão fasorial de sequência negativa da fase a);
- $\bar{Z}_{th-2}^{BLOCO-2}$, o equivalente de Thévenin do Bloco 2, ou seja, $j \cdot X_{a2}$.

$$\dot{I}_{a0} = -\frac{\dot{V}_{a1}}{\bar{Z}_{th-0}^{BLOCO-0}} \tag{2.29}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a0}$, a corrente fasorial de sequência zero da fase a;
- $\dot{V}_{a1}$, a tensão fasorial de $\dot{V}_{a0}$ (tensão fasorial de sequência zero da fase a);
- $\bar{Z}_{th-0}^{BLOCO-0}$, o equivalente de Thévenin do Bloco 0, ou seja, $j \cdot 3 \cdot Z_N + j \cdot X_{a0}$;

2.4.2.4 Circuitos de sequência do gerador para o curto-circuito 1ϕ-terra

A seguir é analisado o curto-circuito monofásico, vale relembrar que o cálculo do curto-circuito fase-terra mínimo está de acordo com o padrão adotado pelas respectivas concessionárias em território nacional, no caso aplicado ao Sistema Radial ou Sistema Radial Multiaterrado (COPEL Distribuição S.A., 2021; KINDERMANN, 2007). No entanto, não será discutido neste TCC.

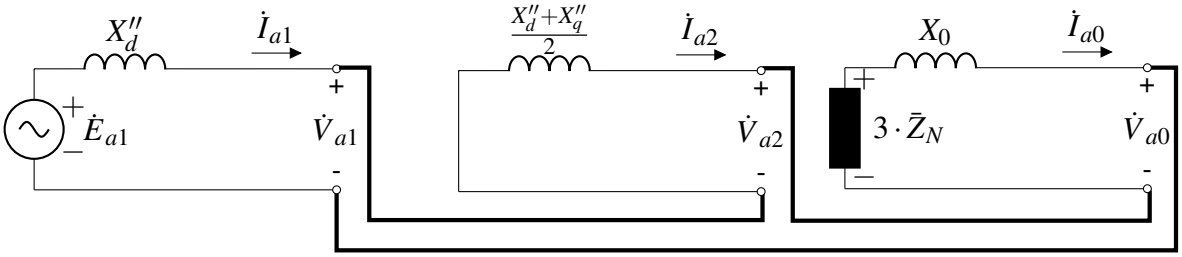
Operando-se a matriz inversa T^{-1}, sob as condições iniciais de **curto-circuito** 1ϕ**-terra** nos terminais do gerador, obtêm-se uma combinação dos blocos de sequência. Essa combinação formará o circuito de sequência para um curto-circuito monofásico (STEVENSON, 1978, p. 273), como mostrado na Figura 13.

Por fim, as condições iniciais são aplicadas às correntes reais na matriz coluna na Expressão 2.30. O circuito equivalente monofásico dos blocos de sequência terá os três blocos ativos, mas alimentados somente pela tensão interna de sequência positiva. A partir da matriz inversa T^{-1}, agora em relação às correntes, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_c = 0 \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

Operando a Equação 2.30 sob as condições iniciais do curto monofásico, ou seja, $\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$ e $\dot{V}_a = 0$, tem-se $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2}$, tem-se o circuito mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Modelos de Sequência da máquina síncrona em curto monofásico-terra: conexão série.



FONTE: adaptado de Stevenson (1978, p. 273)

A corrente de sequência positiva pode ser calculada considerando-se a soma das reatâncias de sequência positiva, negativa e zero, além da impedância equivalente de aterramento ($3 \times \bar{Z}_N$). Note que essa soma, que vai no denominador da Equação 2.31, é o equivalente de Thévenin, $\bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE}$, visto pelos terminais do gerador síncrono à vazio. Cabe lembrar, novamente, que a tensão interna do gerador síncrono, $\dot{E}$, é substituída pela tensão de falta, $\dot{V}_f$, num SEP em curto-circuito, no caso em questão o curto monofásico. A corrente de curto-circuito fase-terra é, então, dada por:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{a1}}{j \cdot X_{a1} + j \cdot X_{a2} + j \cdot X_{a0} + j \cdot 3 \cdot Z_N} \tag{2.31}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a1}$, a corrente fasorial de curto-circuito monofásico de sequência positiva, da fase a;

- $\dot{E}_{a1}$, a tensão interna fasorial do gerador síncrono à vazio em curto-circuito monofásico, da fase a;
- $j \cdot X_{a0}$, a reatância de sequência zero do curto-circuito monofásico, da fase a;
- $j \cdot X_{a1}$, a reatância de sequência positiva do curto-circuito monofásico, da fase a;
- $j \cdot X_{a2}$, a reatância de sequência negativa do curto-circuito monofásico, da fase a;
- $j \cdot 3 \cdot Z_N$, a impedância equivalente de aterramento, para a conexão do ponto de neutro no enrolamento estrela (Y-at), do curto-circuito monofásico, da fase a;
- $\bar{Z}_{Th-1}^{terminal-GE} = j \cdot X_{a1} + j \cdot X_{a2} + j \cdot X_{a0} + j \cdot 3 \cdot Z_N$, o equivalente de Thévenin de sequência positiva nos terminais do gerador à vazio para o curto-circuito monofásico, da fase a.

Ademais, as correntes das sequências negativa e zero existem e são calculadas pela Expressão 2.32. Verifica-se que essas são iguais à corrente da sequência positiva (STEVENSON, 1978, p. 273), de acordo com a Figura 13.

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a1} \tag{2.32}$$

Onde:

- $\dot{I}_{a0}$, a corrente fasorial de sequência zero, da fase a, para curto-circuito monofásico;
- $\dot{I}_{a2}$, a corrente fasorial de sequência negativa, da fase a, para curto-circuito monofásico.

Dessa maneira, concluí-se a discussão acerca dos modelos de sequência para as máquinas síncronas. E também, para o SEP em geral, seja ele radial ou em anel, já que a discussão evidenciou que, bastando trocar a tensão interna da máquina síncrona à vazio, $\dot{E}$, pela tensão de falta, $\dot{V}_f$, e considerando o equivalente de Thévenin nas expressões analisadas, é possível calcular as correntes de curto-circuito em qualquer cenário, seja nos terminais da máquina síncrona, numa barra de um Alimentador, na barra de uma SE ou até mesmo num ponto de x metros de uma linha de transmissão. Contudo, ainda é preciso discutir algumas ideias, sobre os diagramas de sequência zero de transformadores, equivalentes de impedâncias de linhas de transmissão e a generalização das expressões discutidas para uso matricial.

2.4.3 Modelos de sequência do transformador

Os transformadores possuem um característica singular sob ação de um curto-circuito que depende do diagrama de sequência zero. De acordo com (STEVENSON, 1978, p. 264), por definição, as correntes de sequência zero nas três fases do transformador são iguais, em

módulo e fase. Contudo, essas correntes só poderão existir se houver um caminho de retorno (GND) pelo qual o circuito possa ser fechado.

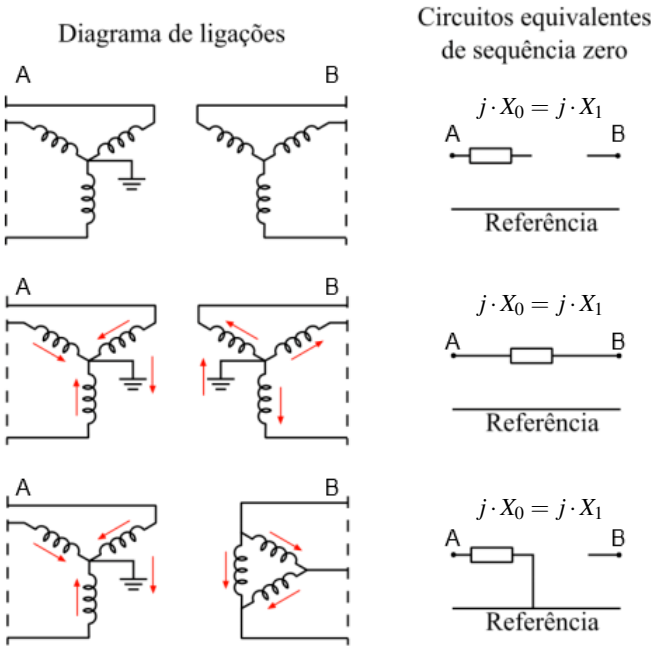
Assim, devido a presença de enrolamentos em delta e/ou estrela não aterrado em transformadores, seja de núcleo envolvente ou de núcleo envolvido, haverá blocos de sequência zero em aberto. Assim a impedância nesses casos é infinita (STEVENSON, 1978, p. 265), ou inexistente do ponto de vista do *software* SHOT-C. Já as impedâncias dos Blocos 1 e 2 são simplesmente iguais e equivalentes à reatância série do transformador para modelagem série em curto-circuito.

Ainda com respeito as impedâncias de sequência zero, Kindermann (2007, p. 84-95) mostra todos os ensaios de obtenção das impedâncias do transformador de núcleo envolvente e núcleo envolvido para relação primário vs secundário, ou seja: ⅄-GND **vs** ⅄-GND, ⅄-GND **vs** Δ, ⅄ **vs** Δ, Δ **vs** Δ, ⅄-GND **vs** ⅄, ⅄ **vs** ⅄ e por último ⅄-GND **vs** ⅄-GND ambas com impedância de aterramento. Sato e Freitas (2015, p. 138-142) e Bichels (2018, p. 176-180) também discutem alguns desses ensaios, porém em menor extensão.

Cabe destacar que, dos ensaios de obtenção dos modelos de sequência do transformador de núcleo envolvente e, para mesmo tipo de conexão da configuração primário vs secundário, do transformador de núcleo envolvido, são obtidos diferentes modelos de sequência zero, os diferentes modelos de sequência são mostrados nas Figuras 14, 15 e 16.

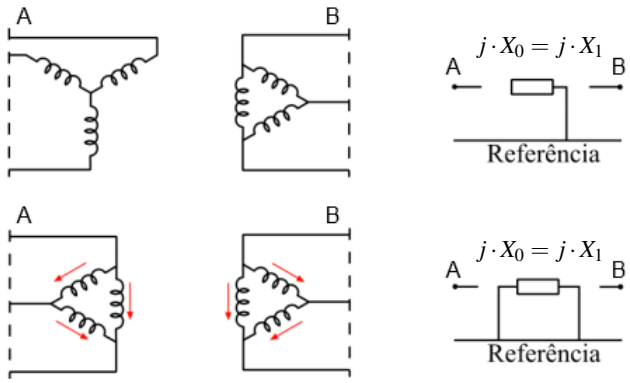
Destaca-se, ainda, que os ensaios descritos nas referências foram realizados sobre transfomadores monofásicos de dois enrolamentos, indo de encontro com a delimitação do tema deste TCC, não sendo considerados transformadores de 3 enrolamentos.

Figura 14 – Modelos de Sequência Zero do Transformador monofásico de núcleo envolvente com primário estrela aterrado



FONTE: adaptado de Oliveira (2016, p. 54)

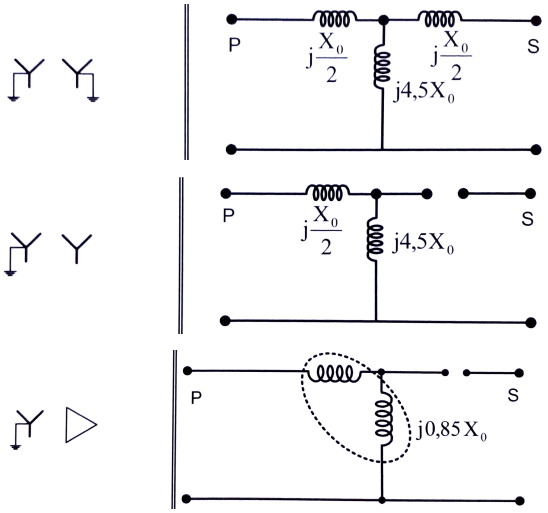
Figura 15 – Modelos de Sequência Zero do Transformador monofásico de núcleo envolvente



FONTE: adaptado de Oliveira (2016, p. 54)

As Figuras 14 e 15 mostram alguns casos de modelos de sequência zero, com suas respectivas impedâncias complexas, para transformadores trifásicos de dois enrolamentos com núcleo envolvente. Enquanto que a Figura 16 mostra os modelos de sequência zero, com suas respectivas impedâncias complexas, para transformadores trifásicos de dois enrolamentos com núcleo envolvido. Assim, como dito anteriormente, existe uma diferença entre as impedâncias das Figuras 14 e 16, embora essas figuras tenham as mesmas ligações, devido ao tipo de núcleo.

Figura 16 – Modelos de Sequência Zero do Transformador trifásico de núcleo envolvido



FONTE: Kindermann (2018, p. 107)
LEGENDA: equivalentes por fase. Note os valores sobre as reatâncias.

A seguir, na Seção 2.4.4, são apresentados brevemente os modelos de sequência das linhas de transmissão (LTs). Este modelo vale para linhas de subtransmissão e distribuição com algumas ressalvas. Do ponto de vista do software de curto-circuito SHOT-C, para uso acadêmico, é uma abordagem satisfatória. E por fim, na seção 2.4.5, será apresentado a generali-

zação dos modelos de sequência pelo *Rake* de impedâncias apresentado por Glover e Sarma (1994), encerrando a fundamentação sobre modelos de sequência aplicados ao SEP para uso no *software* SHOT-C.

2.4.4 Modelos de sequência de linhas de transmissão (LT) e cargas lineares

Assim como no estudo dos transformadores, as impedâncias de sequências positiva e negativa das Linhas de Transmissão (LTs) são iguais. Já a impedância de sequência zero precisa de ponderações para sua obtenção, considerando-se o cabo de cobertura e o terra liberado entre o ponto de curto-circuito e a fonte (SE) (KINDERMANN, 2007, p. 119). Ainda de acordo com Kindermann (2007, p. 121-123), calcula-se a impedância de sequência zero como sendo entre 2 e 6 vezes a impedância positiva.

Por outro lado, de acordo com Glover, Sarma e Overbye (2011, p. 438-444), as impedâncias de sequência, tanto das linhas de transmissão sem cargas rotativas, ou linhas trifásicas com transposição, quanto cargas trifásicas lineares, podem ser obtidas através da transformação $Z_{sequence}$, calculada pela Equação 2.33, como se segue:

$$Z_{sequence} = T^{-1} \cdot Z_{serie} \cdot T \tag{2.33}$$

Onde:

- $Z_{sequence}$, a transformação à obter;
- Z_{serie}, a matriz de impedâncias **série simétrica** de uma LT com fases **a**, **b** e **c**;
- T, a matriz de transformação do Teorema de Fortescue para componentes simétricas;
- T^{-1}, a matriz inversa de T do Teorema de Fortescue para componentes simétricas;

Assim, aplicando a Expressão 2.33 para o sistema trifásico de potência, tem-se a Expressão 2.34:

$$\begin{bmatrix} Z_0 & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_1 & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

A partir da transformação $Z_{sequence}$ da Expressão 2.34, obtêm-se as equações atreladas às impedâncias de sua diagonal principal, ou seja, Z_1, Z_2 e Z_0. Essas são as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente, das LTs, ou das cargas. Operando a Expressão 2.34, tem-se que as impedâncias de sequência das LTs, e estas estão em função das

impedâncias séries simétricas da matriz Z_{serie} (que formam as linhas ou as cargas no sistema trifásico de potência).

Resolvendo a Equação 2.34, são dadas as Equações 2.35, 2.36 e 2.37, para as impedâncias das sequência positiva, negativa e zero das LTs, respectivamente, como se segue:

$$Z_1 = Z_{aa} - Z_{ab} \tag{2.35}$$

Sendo:

- Z_1, impedância complexa de sequência positiva de uma LT ou carga 3ϕ, equivale à $\bar{Z}_1$;
- Z_{aa}, impedância complexa série simétrica da matriz Z_{serie}, equivale à $\bar{Z}_{aa}$;
- Z_{ab}, impedância complexa série simétrica da matriz Z_{serie}, equivale à $\bar{Z}_{ab}$;

$$Z_2 = Z_1 = Z_{aa} - Z_{ab} \tag{2.36}$$

Sendo:

- Z_2, impedância complexa de sequência negativa de uma LT ou carga 3ϕ, equivale à $\bar{Z}_2$;

$$Z_0 = Z_{aa} + 2 \cdot Z_{ab} \tag{2.37}$$

Sendo, da Expressão 2.37:

- Z_0, impedância complexa de sequência zero de uma LT ou carga 3ϕ, equivale à $\bar{Z}_0$;

Antes de apresentar os modelos de sequência para LT e cargas, vale ressaltar que, para obtenção da impedância equivalente de uma LT, é considerado o método de transposição para se compensar os desequilíbrios dos campos magnéticos entre fases, cabo de cobertura, ferragens e do solo sob a linha de transmissão (KINDERMANN, 2007, p. 119). Ainda de acordo com Bichels (2018, p. 91), o modelo série da LT é usado em estudos de regime permanente, e também, é adequado para o estudo de curto-circuito. Ademais, Bichels (2018, p. 91) ainda sinaliza outra possibilidade de transposição de linhas, ou seja, o fator fracionário, para obtenção da impedância média de Z_{serie} simétrica, pode ser diferente de $1/3$.

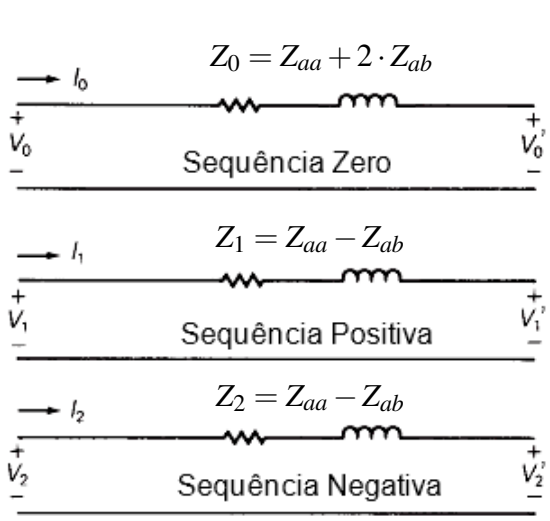
Considerando que a LT seja transposta e portanto, equilibrada, e que as cargas sejam equilibradas, tem-se a condição descrita pela Equação 2.38.

$$\text{Condicional LT e Carga } 3\phi \qquad \begin{cases} Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} \\ Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc} \end{cases} \tag{2.38}$$

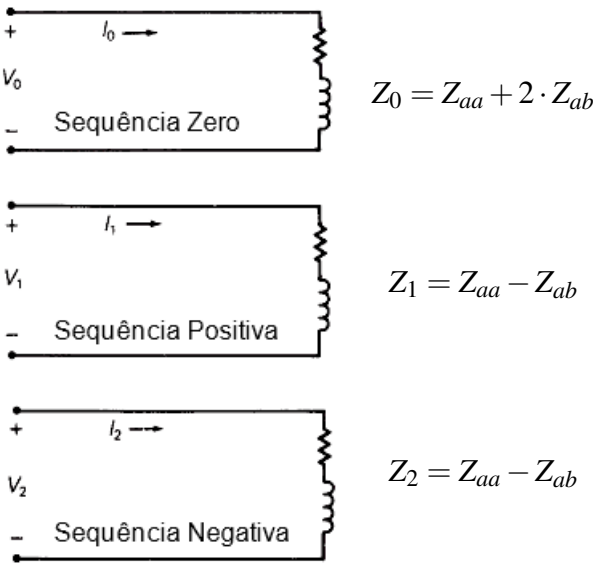
Sob as condições da Expressão 2.38, tem-se que a matriz de transformação, $Z_{sequence}$, é uma matriz diagonal, garantida pela simetria da matriz Z_{serie} (GLOVER; SARMA, 1994, p. 181). Ou seja, para os índices da matriz $Z_{sequence}$, onde o índice linha é diferente do índice coluna, então a impedância será nula (GLOVER; SARMA; OVERBYE, 2011, p. 440). Dessa maneira, tem-se as Figuras 17(a) e 17(b) mostrando as impedâncias da sequência zero, da sequência positiva e da sequência negativa, respectivamente, para uma LT 3ϕ e uma carga 3ϕ, considerando-se as Expressões 2.35, 2.36 e 2.37.

Vale relembrar que neste trabalho a entrada de dados de impedância das linhas de transmissão admite somente as reatâncias série das linhas, ou seja, as impedâncias sem a parte real (apenas a parte imaginária de $\bar{Z}_1$, $\bar{Z}_2$ e $\bar{Z}_0$). Também não são considerados os elementos shunt das LTs, se houver.

Figura 17 – Modelos de Sequência para uma LT 3ϕ e uma Carga 3ϕ.



(a) Modelos de Sequência para LT.



(b) Modelos de Sequência para Carga.

FONTE: adaptado de Glover, Sarma e Overbye (2011, p. 443-444)

Dessa maneira, concluí-se a fundamentação dos modelos de sequência para máquinas síncronas, transformadores, linhas de transmissão e cargas trifásicas. Cabe agora, considerando a combinação desses modelos de sequência, a obtenção do unifilar do SEP desejado. A seguir, na Seção 2.4.5, será fornecido as expressões matemáticas relativas à generalização, com obtenção das correntes simétricas e assimétricas, de um SEP com n barras em curto-circuito. Além disso, ainda na seção a seguir, será fornecido a expressão generalizada, de um SEP de n barras, para o cálculo das tensões, simétricas e assimétricas, atreladas à correntes dos curtos-circuitos simétricos e assimétricos.

2.4.5 Modelos de sequência via Rakes de Impedâncias de Thévenin (RIT)

Nesta seção são apresentados os modelos de sequência generalizados para curtos-circuitos, simétricos e assimétricos. Esses modelos gerais são aqui denominados de Rakes de Impedâncias de Thévenin (RIT) (GLOVER; SARMA, 1994, p. 311).

As condições estabelecidas para os RITs e para o *software* de curto-circuito SHOT-C são equivalentes, uma vez que as impedâncias consideradas são somente reatâncias indutivas do sistema. Além disso, os RITs estão atrelados às equações gerais de correntes e tensões de curtos-circuitos simétricos e assimétricos, tornando-os indispensáveis para compreensão dessas expressões.

De acordo com Glover e Sarma (1994, p. 356-358), modelos de sequência dos curtos-circuitos simétricos e assimétricos podem ser representados pelos circuitos equivalentes de barras, ou *rakes* equivalentes. As condições estabelecidas para uso desses *rakes* são:

- o SEP é operado em regime permanente antes da ocorrência de um curto-circuito;
- os diagramas de sequência positiva, negativa e zero são desacoplados antes da ocorrência do curto-circuito. E durante a falta assimétrica esses diagramas são interconectados somente no local da falta;
- a indutância de motores será admitida, para este TCC, da mesma maneira que as máquinas síncronas;
- resistências, admitâncias *shunt* e impedâncias de cargas não rotativas são negligenciadas;
- a tensão de pré-falta, $\dot{V}_F$, é incluída ao *rake* de sequência positiva;
- correntes de pré-falta são negligenciadas (garantindo-se, assim, que todas as tensões de pré-falta em todos elementos do SEP sejam iguais a $\dot{V}_F$);
- impedâncias mútuas não são mostradas nos *rakes*;
- para um SEP trifásico de N barras, a impedância Z_{nn} representa o equivalente de Thévenin na barra n, e suas componentes de sequência são representadas por Z_{nn-1}, Z_{nn-2} e Z_{nn-0}, sendo respectivamente, as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero. Neste caso, n não é necessariamente igual a N;
- as correntes de sequência são obtidas pelas variáveis I_{n-1}, I_{n-2} e I_{n-0}, sendo respectivamente, as correntes de sequência positiva, negativa e zero. Onde n é a variável da barra em curto-circuito;
- as tensões de sequência são obtidas pelas variáveis V_{k-1}, V_{k-2} e V_{k-0}, sendo respectivamente, as tensões de sequência positiva, negativa e zero. Onde k é a variável relativa à qualquer barra do SEP durante um curto-circuito na barra n;

- se uma barra k estiver isolada sem a possibilidade de contribuição de curto-circuito em um modelo de sequência, por causa de um transformador delta:estrela-aterrado (Δ : 人-GND), por exemplo, então as tensões V_{k-1} e V_{k-2} devem ser modificadas para se levar em conta os deslocamentos de fase do delta:estrela-aterrado, no caso em $\pm 30^{\circ}$ ou padrão adotado (GLOVER; SARMA, 1994, p. 352-355). Contudo, esta condição será negligenciada para o *software* SHOT-C, pois exige um *feedback* às correntes já calculadas, tornando necessário ampliar os requisitos de entrada e a amplificação da metodologia adotada neste trabalho, não se aplicando portanto ao TCC;

- as tensões e correntes reais podem ser calculadas utilizando-se o Teorema de Fortescue, aplicando-se às matrizes T e T^{-1};

- as impedâncias de faltas serão admitidas nulas, $\bar{Z}_F$ = 0, ou seja, para o *software* SHOT-C as impedâncias extraordinárias $\bar{Z}_F$, mostradas nos RITs, serão negligenciadas. Contudo, cabe destacar que a maior parte dos curtos-circuitos são resultantes de impedâncias de faltas atreladas a arcos em isoladores; a impedância entre a linha e a terra com dependência de resistência do arco, da torre e até da base da torre, caso não se utilize cabos de aterramento (STEVENSON, 1978, p. 292-293).

Nas próximas subseções, são exibidos os modelos de sequências, os RITs, para os curtos-circuitos monofásico, trifásico, bifásico e o bifásico-terra, encerrando-se, assim, o capítulo sobre curtos-circuitos, que visa apresentar os fundamentos e os modelos de sequência.

A Equação 2.39, mostra como calcular as tensões de sequência de fase para qualquer barra k durante um curto-circuito na barra n, de um SEP de N barras, onde n é igual a qualquer elemento de um conjunto de barras igual a {1, 2, 3, ..., k, ...N}. Além disso, a Equação 2.39 aplica-se à qualquer RIT que é apresentado, e por isso a antecipação da expressão das tensões de sequência, evidenciando-a. Já com relação ao cálculo das correntes de sequência, as expressões dessas são mostradas junto aos RITs.

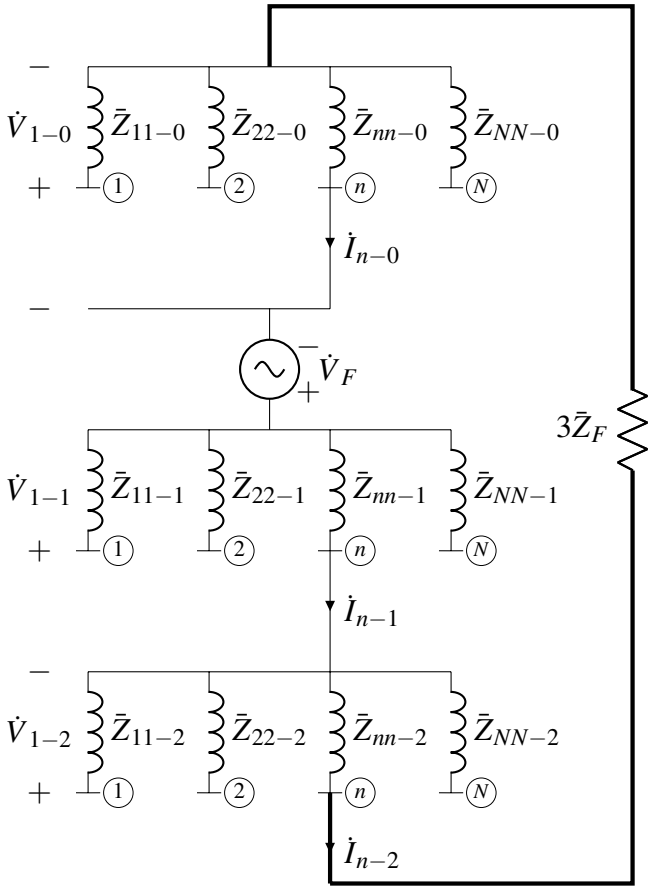
$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{k-0} \\ \dot{V}_{k-1} \\ \dot{V}_{k-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{V}_F \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{kn-0} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{kn-1} & 0 \\ 0 & & \bar{Z}_{kn-2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{n-0} \\ \dot{I}_{n-1} \\ \dot{I}_{n-2} \end{bmatrix} \tag{2.39}$$

2.4.5.1 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito monofásico

Nesta seção é mostrado de forma breve o modelo de sequência para o curto-circuito monofásico generalizado, o RIT monofásico mostrado na Figura 18. A única equação necessária para calcular todas as correntes de sequência, para este tipo de curto-circuito é apresentado na Equação 2.40, para o cálculo das correntes I_{n-1}, I_{n-2} e I_{n-0}, respectivamente as correntes

das sequências positiva, negativa e zero. Ademais, cabe destacar que essas correntes estão generalizadas para um SEP de N barras.

Figura 18 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito monofásico.



FONTE: adaptado de Glover e Sarma (1994, p. 357)

$$\dot{I}_{n-1} = \dot{I}_{n-2} = \dot{I}_{n-0} = \frac{\dot{V}_F}{\bar{Z}_{nn-1} + \bar{Z}_{nn-2} + \bar{Z}_{nn-0} + 3 \cdot \bar{Z}_F} \tag{2.40}$$

Onde:

- $\dot{I}_{n-1}$, corrente de sequência positiva de curto-circuito monofásico (GLOVER; SARMA, 1994, p. 358).
- $3\bar{Z}_F$, impedância extraordinária equivalente para casos reais de curto-circuito monofásico, onde ocorre há a presença de uma impedância de falta (STEVENSON, 1978, p. 292-293).

A Figura 18 é formada pelo empilhamento dos Blocos genéricos 0, 1 e 2, análogo à Figura 13, como discutido na seção sobre modelos de sequência do gerador síncrono, a seção 2.4.2. O *rake* positivo que contém a fonte $\dot{V}_F$ acima do barramento comum às impedâncias

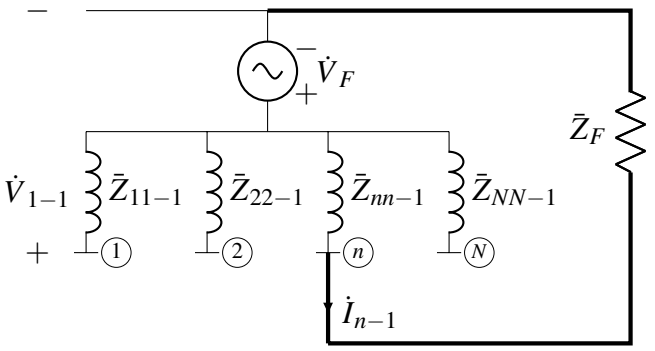
$\bar{Z}_{nn-1}$, da Figura 18, equivale à generalização do Bloco 1 da Figura 10, desconsiderando-se o curto individual. O *rake* negativo que contém a corrente $\dot{I}_{n-2}$ na parte inferior da Figura 18 equivale à generalização do Bloco 2 da Figura 10, desconsiderando-se o curto individual. E por fim, O *rake* zero que contém a corrente $\dot{I}_{n-0}$ na parte superior da Figura 18 equivale à generalização do Bloco 0 da Figura 10, desconsiderando-se o curto individual.

A interligação mostrada à direita da Figura 18, equivale a conectar o terminal inferior do Bloco genérico 2 ao terminal superior do Bloco genérico 0, ou seja, o mesmo procedimento realizado na Figura 13. Dessa maneira, fica evidenciado a equivalência do RIT monofásico ao modelo de sequência de curto-circuito monofásico apresentado na seção 2.4.2.4.

2.4.5.2 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito trifásico

Nesta seção é mostrado o modelo de sequência para o curto-circuito trifásico generalizado, o RIT trifásico e a equação da corrente de sequência para este tipo de curto-circuito. O RIT para curto trifásico é apresentado na Figura 19 e em seguida, junto deste, é mostrada a Equação 2.41 para o cálculo das corrente I_{n-1}, ou seja, a corrente de sequência positiva. As demais correntes, I_{n-2} e I_{n-0}, respectivamente, negativa e zero, são nulas. Ademais, cabe destacar que essas correntes estão generalizadas para um SEP de N barras.

Figura 19 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito trifásico.



FONTE: adaptado de Stevenson (1978, p. 293)

$$\dot{I}_{n-1} = \frac{\dot{V}_F}{\bar{Z}_{nn-1} + \bar{Z}_F} \tag{2.41}$$

Onde:

- $\dot{I}_{n-1}$, corrente de sequência positiva de curto-circuito trifásico (GLOVER; SARMA, 1994, p. 358).
- $\bar{Z}_F$, impedância extraordinária admitida para casos reais de curto-circuito, onde ocorre a presença de uma impedância de falta (STEVENSON, 1978, p. 293-294).

A Figura 19 é formada somente pelo Bloco genérico 1, análogo à Figura 10, como discutido na seção sobre modelos de sequência do gerador síncrono, a seção 2.4.2. Este *rake* positivo obrigatoriamente contém a fonte $\dot{V}_F$, acima do barramento comum às impedâncias $\bar{Z}_{nn-1}$, da Figura 19, e equivale à generalização do Bloco 1 da Figura 10, **com o curto individual**. A generalização dos Blocos 2 e 0 não existem, assim como os Blocos 2 e 0 da Figura 10, pois estes estão inativos.

A interligação mostrada à direita na Figura 19, equivale a conectar o terminal inferior ao terminal superior realizando-se um curto individual, ou seja, o mesmo procedimento realizado na Figura 10. Dessa maneira, fica evidenciado a equivalência do RIT trifásico ao modelo de sequência de curto-circuito trifásico apresentado na seção 2.4.2.1.

Já relativo à Equação 2.41 foi considerado a impedância de falta $\bar{Z}_F$ ao seu denominador, estando de acordo com Stevenson (1978, p. 293). Assim, adaptou-se o modelo apresentado por Stevenson (1978, p. 293) para a Figura 19, pois nem Glover e Sarma (1994, p. 357) e nem Glover, Sarma e Overbye (2011, p. 493) fizeram essa consideração.

2.4.5.3 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito bifásico

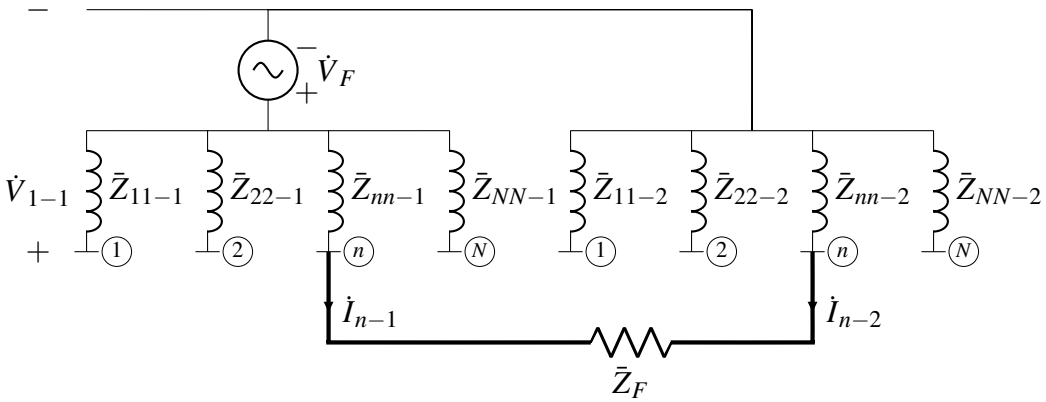
Nesta seção é mostrado na Figura 20 o modelo de sequência para o curto-circuito bifásico generalizado, e a equação para cálculo das correntes de sequência descrita na Equação 2.42 para o cálculo das correntes I_{n-1} e I_{n-2}, respectivamente as correntes das sequências positiva e negativa. A corrente de sequência zero, I_{n-0}, é nula. Ademais, cabe destacar que essas correntes estão generalizadas para um SEP de N barras.

$$\dot{I}_{n-1} = -\dot{I}_{n-1} = \frac{\dot{V}_F}{\bar{Z}_{nn-1}+\bar{Z}_{nn-2}+\bar{Z}_F} \tag{2.42}$$

Onde:

- $\dot{I}_{n-1}$, corrente de sequência positiva de curto-circuito bifásico (GLOVER; SARMA, 1994, p. 358).

Figura 20 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito bifásico.

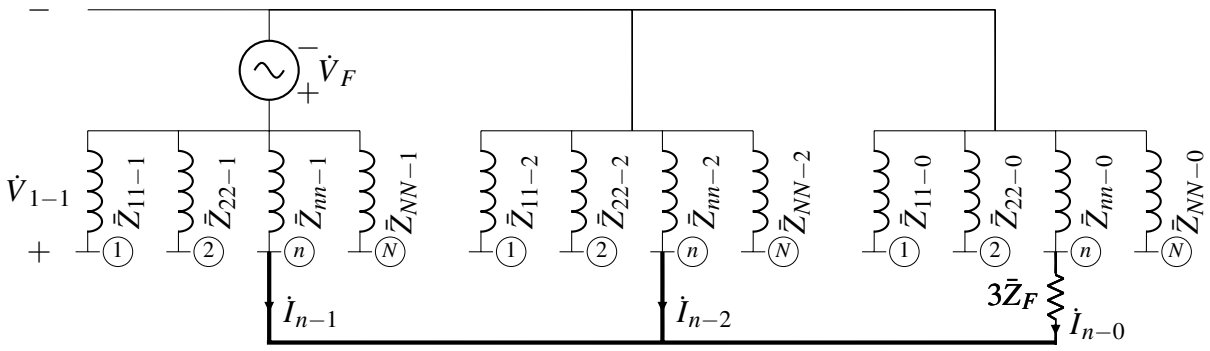


FONTE: adaptado de Glover e Sarma (1994, p. 357)

2.4.5.4 Modelo de sequência do RIT para o curto-circuito bifásico-terra

O modelo de sequência para o curto-circuito bifásico-terra generalizado, o RIT bifásico-terra, e as equações das correntes de sequência, são dadas a seguir este tipo de curto-circuito. O RIT bifásico-terra é apresentado na Figura 21 e em seguida, junto deste, são mostrados as Equações 2.43, 2.44 e 2.45 para o cálculo das correntes I_{n-1}, I_{n-2} e I_{n-0}, respectivamente as correntes das sequências positiva, negativa e zero. Ademais, cabe destacar que essas correntes estão generalizadas para um SEP de N barras.

Figura 21 – Rake de Impedâncias de Thévenin (RIT) para o curto-circuito bifásico-terra.



FONTE: adaptado de Glover e Sarma (1994, p.357)

$$\dot{I}_{n-1} = \frac{\dot{V}_F}{\bar{Z}_{nn-1} + \frac{\bar{Z}_{nn-2} \cdot (\bar{Z}_{nn-0} + 3\bar{Z}_F)}{\bar{Z}_{nn-2} + \bar{Z}_{nn-0} + 3\bar{Z}_F}} \tag{2.43}$$

Onde:

- $\dot{I}_{n-1}$, corrente de sequência positiva de curto-circuito bifásico-terra.

$$\dot{I}_{n-2} = (-\dot{I}_{n-1}) \cdot \left(\frac{\bar{Z}_{nn-0}+3\bar{Z}_F}{\bar{Z}_{nn-0}+3\bar{Z}_F+\bar{Z}_{nn-2}}\right) \tag{2.44}$$

Onde:

- $\dot{I}_{n-2}$, corrente de sequência negativa de curto-circuito bifásico-terra (GLOVER; SARMA, 1994, p. 358).

$$\dot{I}_{n-0} = (-\dot{I}_{n-1}) \cdot \left(\frac{\bar{Z}_{nn-2}}{\bar{Z}_{nn-0}+3\bar{Z}_F+\bar{Z}_{nn-2}}\right) \tag{2.45}$$

Onde:

- $\dot{I}_{n-0}$, a corrente de sequência zero de curto-circuito bifásico-terra (GLOVER; SARMA, 1994, p. 358).

2.5 Conclusão do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os conceitos principais sobre o curto-circuito no sistema elétrico de potência (SEP) e os modelos simplificados para estudo dos curtos-circuitos para as máquinas síncronas, modelo dos transformadores com dois enrolamentos e das linhas de transmissão não longas.

Além disso, apresentou-se a teoria das componentes simétricas aplicadas a um sistema polifásico de "n" fases, aplicado ao sistema elétrico de potência trifásico. A utilidade dessa teoria visa resolver sistemas elétricos trifásicos desequilibrados por curto-circuitos.

Por fim, foram apresentados os modelos de sequência para cálculo das correntes de curtos-circuitos simétricos e assimétricos, que são o objetivo principal do TCC. Atrelado a este objetivo, também, está o cálculo das impedâncias de Thévenin. Utilizou-se de uma longa discussão do modelos de sequência para mostrar como calcular as correntes de sequência nos RITs, e para evidenciar o comportamento das impedâncias de Thévenin nos curto-circuitos assimétricos, as quais dependem das suas conexões nos circuitos de sequência. Vale ressaltar que a modelagem de componentes desconectados de barras ou da referência (no caso de geradores) nos circuitos de sequência zero apresentou uma dificuldade para implementação computacional, ou seja, para o desenvolvimento do *software* SHOT-C deste TCC.

Essa dificuldade decorre quando um elemento do SEP, como um transformador, não garante continuidade entre os Blocos de sequência positiva, negativa e zero de um curto-circuito assimétrico, mesmo que esse transformador tenha aterramento, deve pelo menos ter continuidade com o Bloco de sequência positiva.

Por fim, no próximo capítulo, no capítulo 3, será discutido como obter os equivalentes de Thevenin, Zbarra, matricialmente por meio da obtenção da matriz de admitância Y-Barra.

3 MÉTODO MATRICIAL DE OBTENÇÃO DE Z-BARRA DE ORDEM ATÉ 10X10

3.1 Introdução

As correntes simétricas e assimétricas dos curtos-circuitos no SEP dependem diretamente da impedância equivalente de Thévenin no ponto de falta. Tendo-se um curto-circuito trifásico em um sistema em anel com até 10 barras, espera-se obter uma matriz Z-Barra de 100 valores nulos e não-nulos. Contudo, tendo-se um curto-circuito assimétrico para o mesmo SEP, por exemplo, um curto-circuito fase-terra, é preciso considerar os Blocos das sequências positiva, negativa e, principalmente, zero, ou diagrama de sequência zero deste sistema, assim, resultando em 3 matrizes Z-Barra de 100 valores nulos e não-nulos.

Ao apresentar os modelos de sequência para o cálculo dos curtos-circuitos simétricos e assimétricos no Capítulo 2, generalizou-se esses modelos a fim de torná-los vinculados às impedâncias indexadas a uma matriz Z-Barra. Por isso, as equações de correntes de curto-circuitos, atreladas aos Rakes de Impedâncias de Thévenin (RITs), estão em função de uma impedância variável $\bar{Z}_{nn}$, como mostrados pelas Equações 2.40, 2.41, 2.42, 2.43, 2.44 e 2.45, respectivamente dos curto-circuitos monofásico, trifásico, bifásico e as três últimas do bifásico-terra. Por fim, as impedâncias de índices nn são as impedâncias da diagonal principal da matriz Z-barra, ou seja, são as impedâncias equivalentes do ponto de vista da barra em curto-circuito (impedância “vista” entre a barra e o terra-GND).

O cálculo manual das impedâncias equivalentes de Thévenin, para um SEP em anel é dificultado pelas conversões estrela-triângulo e operações matemáticas de equivalente série e paralelo – negligenciando-se o deslocamento de fontes, curto-circuitando-as. Sendo assim, para um SEP em anel, dependendo da configuração, a tarefa de obtenção do equivalente de Thévenin manualmente torna-se uma tarefa árdua e sujeita a erros. Na seção a seguir, é apresentada uma metodologia para obtenção da matriz dos equivalentes de Thévenin, a partir de uma matriz Z-Barra de até 10 barras. Esta limitação foi estabelecida para este trabalho em função do método de inversão de matrizes adotado para o *software* SHOT-C não utilizar técnicas otimizadas para inversão de Y-Barra, como, por exemplo, a técnica de esparsidade de matrizes. Dessa forma, o SHOT-C é uma ferramenta para cálculo de curto-circuito em SEPs de pequeno porte.

3.2 A matriz de admitâncias Y-Barra

Tecidas as considerações inicias, é apresentado uma metodologia para obtenção das impedâncias de Thévenin indexadas a uma matriz Z-barra. Esta metodologia consiste em montar uma matriz de admitâncias indexadas de mesma ordem e índices equivalentes à Z-barra.

Feito isso, o método consiste em inverter a matriz Y-barra para se obter a matriz Z-barra. Para tanto, delimitou-se este TCC a uma Y-Barra de ordem 10x10.

O foco deste capítulo consiste em detalhar a formulação genérica de inversão, bem como o fluxograma de implementação da inversão de matrizes, através das funções utilizadas na linguagem C do *software* de curtos-circuitos SHOT-C, para obtenção, processamento e cálculo da Y-barra e da Z-barra.

3.3 A origem das matrizes Z-Barra

Nessa seção, inicialmente são apresentadas algumas considerações:

- As tensões de sequência de curto-circuito são formadas pela combinação linear de uma, ou duas, fonte(s) de tensão de falta $\dot{V}_F$;
- O curto-circuito trifásico é formado por uma tensão de sequência positiva de combinação linear de duas fontes de tensão de falta $\dot{V}_F$, opostas entre si.
- Na falta trifásica, a primeira fonte de falta $\dot{V}_F$ está atrelada à condicional de que as correntes de cargas de pré-falta são negligenciadas;
- Na falta trifásica, a segunda fonte de falta $\dot{V}_F$ está atrelada ao circuito de corrente simétrica ou subtransitória de falta. Esta corrente naturalmente está ancorada à impedância equivalente de Thevenin e à tensão de pré-falta, consequentemente é possível modelar esse circuito por um modelo de sequência positiva, contudo a impedância do modelo deve ser obtida à parte;
- Uma vez estabelecido que há um circuito de sequência positiva que depende da impedância de Thévenin, então é possível generalizar esse circuito para um SEP de N barras, e é então que surge a matriz Z-Barra de sequência positiva;
- Nas faltas assimétricas, as correntes de curto-circuito dependem, também, de pelo menos uma tensão de pré-falta $\dot{V}_F$;
- Diferentemente da falta trifásica, a modelagem das faltas assimétricas é feita usando os modelos de sequência;
- Os modelos de sequência para cálculo das correntes assimétricas, surgem das condições inicias reais do curto-circuito dos elementos no SEP e da análise do Teorema de Fortescue, como discutido no capítuo 2 deste TCC;
- Os modelos de sequência para cálculo das correntes assimétricas, também podem ser obtidos aplicando-se o Teorema Espectral da Álgebra Linear para diagonalização da matriz de impedância de sequência, como mostrado na obtenção dos modelos

de sequência das Linhas de Transmissões (LTs) utilizando-se a Equação 2.33. Dessa forma, todo dispositivo do SEP, seja gerador, motor, transformador, LTs ou cargas, terá uma impedância equivalente de Thévenin de sequência zero, uma impedância equivalente de Thévenin de sequência positiva e uma impedância equivalente de Thévenin de sequência negativa. Do contrário a impedância é infinita;

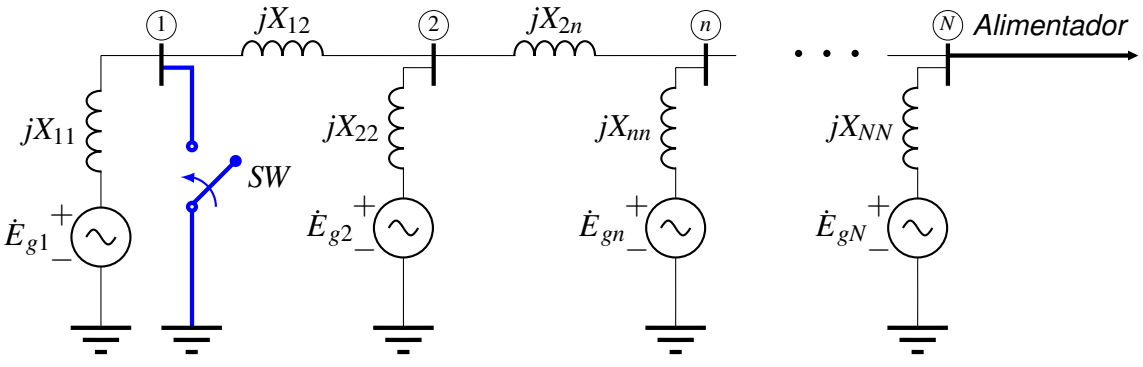
- Uma vez estabelecido que deve haver três circuitos de sequência (positiva, negativa e zero), e que esses circuitos dependem de uma impedância de Thévenin para cada circuito, então é possível generalizar esses circuitos para um SEP de N barras, e é então que surgem as matrizes Z-Barra de sequência positiva, Z-Barra de sequência negativa e Z-Barra de sequência zero;
- Uma vez que, a Z-Barra será obtida pela inversão de uma matriz admitâncias equivalentes, Y-Barra, então deverá haver três matrizes de admitância, ou seja, as matrizes Y-Barra de sequência positiva, Y-Barra de sequência negativa e Y-Barra de sequência zero.

3.3.1 A origem da matriz Z-BARRA positiva

Esta combinação linear advém da origem do método de sobreposição de dois circuitos, que visam representar a falta trifásica em um ponto. Ou seja, durante um curto-circuito a representação da falta em um diagrama unifilar é por meio de duas fontes de tensões opostas contidas num mesmo ramo à terra, resultando em um valor nulo no ponto de falta durante a falta.

Observando a Figura 22, com um curto-circuito na barra 1, esta figura mostra um unifilar de um SEP em regime estacionário com N barras, onde cada barra possui uma máquina síncrona com suas respectivas tensões internas, $\dot{E}_g$, e suas reatâncias subtransitórias, jX_{nn} (onde nn representa elementos conectados da barra à terra).

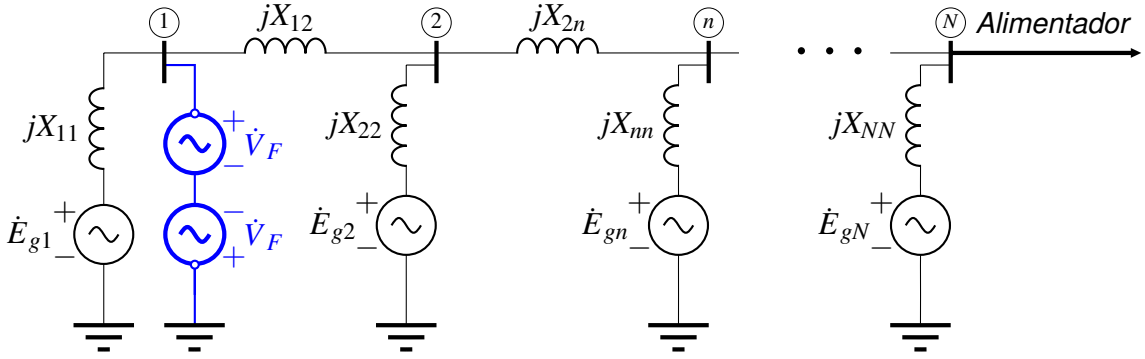
Figura 22 – Exemplo de um diagrama unifilar de um SEP de N barras em regime estacionário



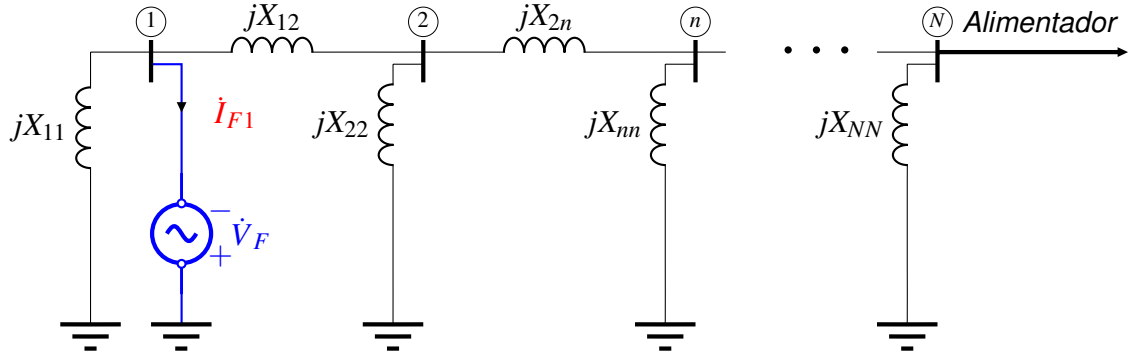
FONTE: autoria própria (2022)

Na Figura 23 são mostrados três unifilares para explicar o método de sobreposição do diagrama de sequência positiva.

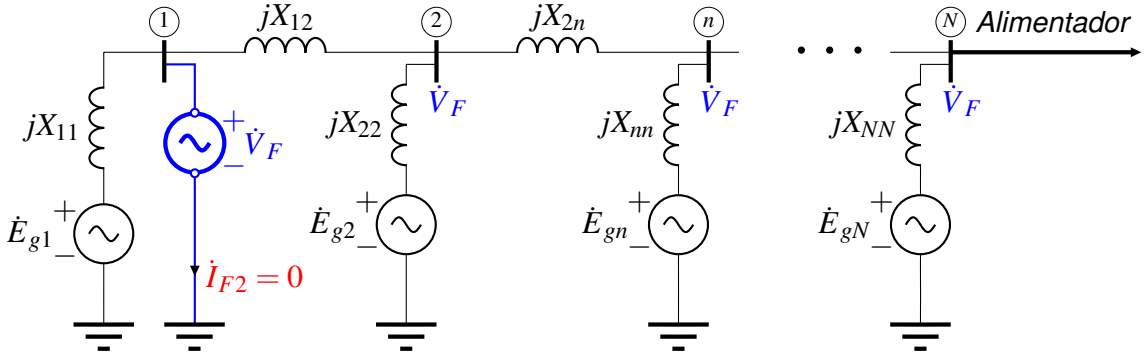
Figura 23 – Método de sobreposição: (a) Exemplo de um diagrama unifilar para um SEP de N barras em regime estacionário; (b) Circuito 1; (c) Circuito 2.



(a) Curto-circuito representado por fontes de tensões simétricas



(b) Circuito 1



(c) Circuito 2

FONTE: autoria própria (2022)

O primeiro unifilar, na Figura 23(a), mostra as fontes simétricas para um curto-circuito trifásico na barra 1. Já as Figuras 23(b) e 23(c) mostram dois circuitos advindos do unifilar da Figura 23(a), respectivamente, os Circuitos 1 e 2.

O cálculo da corrente de curto-circuito trifásico, na barra 1 da Figura 23(a), é fundamentada na sobreposição dos Circuitos 1 e 2 que se aplica à qualquer SEP em curto-circuito. Contudo, cada circuito possui somente uma fonte de tensão de falta, $\dot{V}_F$, além disso, no Circuito 1 curto-circuita-se todas as tensões internas das máquinas síncronas, como mostrado Figura 23(b), do exemplo em discussão. Por outro lado, o Circuito 2, estando sob a condicional de que as correntes de pré-falta das cargas são negligenciadas, as tensões internas de sequência positiva de todas as máquinas síncronas são iguais à tensão de pré-falta $\dot{V}_F$, dessa forma, todas as barras do unifilar estão na mesma tensão de pré-falta e a corrente subtransitória de falta é nula (GLOVER; SARMA, 1994, p. 307), como mostra a Figura 23(c), para o exemplo em discussão.

O Circuito 1 pode ser generalizado para um SEP de N barras através da matriz de Thévenin, a Z-Barra. Ademais, analisando-se a Figura 23(b), é possível verificar que a barra 1, em curto-circuito, possuirá um equivalente de Thévenin formado por uma fonte e uma impedância, onde a fonte de Thévenin será a tensão de pré-falta do circuito 1, e a impedância de Thevenin será o equivalente obtido pelo cascateamento do cálculo de impedâncias equivalentes de série-paralelo desde do Alimentador até a barra 1 do unifiliar discutido.

Assim, a generalização do Circuito 1 para um SEP de N barras, seja ele radial ou em anel, é mostrada na Expressão 3.1. O índice "(1)" da tensões internas é referente ao Circuito 1. Os sinais negativos, da corrente de falta e tensão de falta, se referem à polarização da fonte, esta sendo contrária à polarização da fonte do unfilar do Circuito 2. A Expressão 3.1, em si, diz que apenas haverá uma tensão equivalente a $\dot{E}_{gn}^{(1)} = -\dot{V}_F$, enquanto todas demais tensões serão nulas, por isso que a matriz coluna de correntes só possui um elemento não nulo.

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} & \cdots & \bar{Z}_{1n} & \cdots & \bar{Z}_{1N} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} & \cdots & \bar{Z}_{2n} & \cdots & \bar{Z}_{2N} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{n1} & \bar{Z}_{n2} & \cdots & \bar{Z}_{nn} & \cdots & \bar{Z}_{nN} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{N1} & \bar{Z}_{N2} & \cdots & \bar{Z}_{Nn} & \cdots & \bar{Z}_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -\dot{I}''_{Fn} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_1^{(1)} \\ \dot{E}_2^{(1)} \\ \vdots \\ -\dot{V}_F \\ \vdots \\ \dot{E}_N^{(1)} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Evidenciando-se da Expressão 3.1 acima, tem-se, por fim, a matriz de impedâncias de Thévenin de sequência positiva, a $\bar{Z}^{+}_{BARRA}$, através da Expressão 3.2 com indexação positiva, a seguir.

$$\bar{Z}^{+}_{BARRA} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11-1} & \bar{Z}_{12-1} & \cdots & \bar{Z}_{1n-1} & \cdots & \bar{Z}_{1N-1} \\ \bar{Z}_{21-1} & \bar{Z}_{22-1} & \cdots & \bar{Z}_{2n-1} & \cdots & \bar{Z}_{2N-1} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{n1-1} & \bar{Z}_{n2-1} & \cdots & \bar{Z}_{nn-1} & \cdots & \bar{Z}_{nN-1} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{N1-1} & \bar{Z}_{N2-1} & \cdots & \bar{Z}_{Nn-1} & \cdots & \bar{Z}_{NN-1} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Ainda em decorrência da Expressão 3.1, a corrente de falta subtransitória do Circuito 1, é calculada pela Equação 3.3, a seguir.

$$\dot{I}''_{Fn} = \frac{\dot{V}_F}{\bar{Z}_{nn}} \tag{3.3}$$

Onde:

- $\dot{I}''_{Fn}$, a corrente de falta subtransitória do Circuito 1 – observe que se operou o sinal negativo;
- $\dot{V}_F$, a tensão de pré-falta;
- $\bar{Z}_{nn}$, a impedância equivalente de Thévenin de sequência positiva na barra n. Ademais, também representada por $\bar{Z}_{nn-1}$, ou por $\bar{Z}^{+}_{nn-1}$.

Note que a corrente de falta subtransitória do Circuito 1, é a corrente de sequência positiva para um curto-circuito trifásico, como apresentado pelas Equações 2.22 e 2.41, esta última considerando a impedância de falta.

3.3.2 A origem da matriz Z-BARRA negativa

Como discutido anteriormente, sobre as considerações a respeito das tensões de sequência, é possível verificar que a tensão de sequência negativa depende de uma impedância equivalente de Thévenin de sequência negativa. Sendo assim, para um sistema elétrico de potência trifásico de N barras, seja ele radial ou em anel, é possível representá-lo atráves de um diagrama unifilar de impedâncias de sequência negativa, e se obter uma matriz Z-Barra negativa, $\bar{Z}^{-}_{BARRA}$, com indexação negativa, como se segue na Expressão 3.4:

$$\bar{Z}^{-}_{BARRA} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11-2} & \bar{Z}_{12-2} & \cdots & \bar{Z}_{1n-2} & \cdots & \bar{Z}_{1N-2} \\ \bar{Z}_{21-2} & \bar{Z}_{22-2} & \cdots & \bar{Z}_{2n-2} & \cdots & \bar{Z}_{2N-2} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{n1-2} & \bar{Z}_{n2-2} & \cdots & \bar{Z}_{nn-2} & \cdots & \bar{Z}_{nN-2} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{N1-2} & \bar{Z}_{N2-2} & \cdots & \bar{Z}_{Nn-2} & \cdots & \bar{Z}_{NN-2} \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Onde:

- $\bar{Z}^{-}_{BARRA}$, a matriz de impedâncias de Thévenin de sequência negativa, Z-Barra negativa.
- $\bar{Z}_{nn-2}$, a impedância equivalente de Thévenin de sequência negativa na barra n. Também pode ser representada por $\bar{Z}^{-}_{nn}$.

3.3.3 A origem da matriz Z-BARRA zero

Ademais, sobre as considerações a respeito das tensões de sequêcia, é possível, também, verificar que a tensão de sequência zero depende de uma impedância equivalente de Thévenin de sequência zero. Sendo assim, para um sistema elétrico de potência trifásico de N barras, seja ele radial ou em anel, é possível representá-lo atráves de um diagrama unifilar de impedâncias de sequência zero, e se obter uma matriz Z-Barra zero, $\bar{Z}^{0}_{BARRA}$, com indexação zero, como se segue na Expressão 3.5:

$$\bar{Z}^{0}_{BARRA} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11-0} & \bar{Z}_{12-0} & \cdots & \bar{Z}_{1n-0} & \cdots & \bar{Z}_{1N-0} \\ \bar{Z}_{21-0} & \bar{Z}_{22-0} & \cdots & \bar{Z}_{2n-0} & \cdots & \bar{Z}_{2N-0} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{n1-0} & \bar{Z}_{n2-0} & \cdots & \bar{Z}_{nn-0} & \cdots & \bar{Z}_{nN-0} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Z}_{N1-0} & \bar{Z}_{N2-0} & \cdots & \bar{Z}_{Nn-0} & \cdots & \bar{Z}_{NN-0} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Onde:

- $\bar{Z}^{0}_{BARRA}$, a matriz de impedâncias de Thévenin de sequência zero, Z-Barra zero.
- $\bar{Z}_{nn-0}$, a impedância equivalente de Thévenin de sequência zero na barra n. Também pode ser representada por $\bar{Z}^{0}_{nn}$.

3.4 Construção da matriz Y-Barra de N barras

De acordo com Bichels (2018, p. 191), a formação da matriz de admitâncias, Y-Barra, é um algoritmo preferível para formação da matriz de Thévenin, a Z-Barra, pois possui um menor número de operações de cálculos, sendo requisitado um menor poder de processamento computacional. Sendo assim, para obtenção da Y-Barra, seus elementos $\bar{Y}_{ij}$ são:

- elementos da diagonal principal, para $\bar{Y}_{ii}$ realiza-se a soma das admitâncias conectadas ao nó i, com $i = 1, 2, ..., n$;
- elementos fora da diagonal principal, para $\bar{Y}_{ij}$ iguala-se à admitância conectada entre os nós i e j, sendo $i \neq j$, com sinal trocado, sendo a soma das admitâncias conectadas entre os nós i e j no caso de circuitos em paralelo.

A matriz Y-Barra sob o aspecto prático é formada matricialmente, de forma genérica para um SEP de N barras, pela Expressão 3.6 a seguir, estando de acordo com Carvalho e Kikuchi (2015, p.34), Glover e Sarma (1994, p.25), Stevenson (1978, p.179) e Bichels (2018, p.188).

$$\bar{Y}_{BARRA} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \cdots & \bar{Y}_{1n} & \cdots & \bar{Y}_{1N} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \cdots & \bar{Y}_{2n} & \cdots & \bar{Y}_{2N} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{n1} & \bar{Y}_{n2} & \cdots & \bar{Y}_{nn} & \cdots & \bar{Y}_{nN} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{N1} & \bar{Y}_{N2} & \cdots & \bar{Y}_{Nn} & \cdots & \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

Sob o aspecto computacional (CARVALHO; KIKUCHI, 2015, p. 34-35), para obtenção de Y-Barra, admitindo-se apenas uma impedância entre barras e apenas uma impedância de barra à terra, tem-se as Expressões 3.7 e 3.8, como melhor forma de implementação da iteração computacional. Seguem:

$$\bar{Y}_{ii} = \sum_{j=1}^{N} \bar{y}_{ij} + \bar{y}_{ig} \tag{3.7}$$

Onde:

- $\bar{Y}_{ii}$, a admitância completa para elementos da diagonal principal de Y-Barra;
- $\bar{y}_{ij}$, a admitância existente entre as barras i e j;
- $\bar{y}_{ig}$ ou $\bar{y}_{ii}$, a admitância existente entre a barra i e a terra (nó GND);
- N, o número de barras de um SEP em anel ou radial.

$$\bar{Y}_{ij} = -\bar{y}_{ij} \tag{3.8}$$

Onde:

- $\bar{Y}_{ij}$, a admitância completa para elementos fora da diagonal principal de Y-Barra;

Uma ressalva importante, a matriz Y-Barra é fundamentada nas Leis de Kirchhoff, visto que a metodologia de criação da Y-Barra é baseada na injeção de correntes em um nó (CARVALHO; KIKUCHI, 2015, p. 34), tomando como referência um unifilar, por exemplo. Sendo assim, a matriz de admitância é um método prático e poderoso de indexação das barras de um SEP que viabilizam a obtenção da matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin, uma Z-Barra.

Outra ressalva, a Y-Barra é uma matriz simétrica, pois os elementos obtidos pela Equação 3.8 geram elementos simétricos à diagonal principal da matriz, ou seja, $\bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ji}$, consequentemente a matriz inversa de Y-Barra também será uma matriz simétrica.

3.4.1 A origem da matriz Y-BARRA positiva

Anteriormente, verificou-se que, da discussão sobre o Circuito 1 da Figura 23(b) de uma falta trifásica, a origem da corrente de curto-circuito simétrico ou corrente de sequência positiva está atrelada à matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin de sequência positiva, a matriz $\bar{Z}^{+}_{BARRA}$. Também foi verificado que ao se inverter uma matriz de admitâncias Y-Barra obtêm-se uma matriz de impedâncias Z-Barra, então tem-se uma matriz Y-barra de sequência positiva do tipo $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$, com indexação positiva, atreladada à matriz $\bar{Z}^{+}_{BARRA}$.

Sendo assim, para um sistema elétrico de potência trifásico de N barras, seja ele radial ou em anel, é possível representá-lo atráves de um diagrama unifilar de admitâncias de sequência positiva, e se obter uma matriz Y-Barra positiva, $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$, com indexação positiva, como se segue na Expressão 3.9:

$$\bar{Y}^{+}_{BARRA} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11-1} & \bar{Y}_{12-1} & \cdots & \bar{Y}_{1n-1} & \cdots & \bar{Y}_{1N-1} \\ \bar{Y}_{21-1} & \bar{Y}_{22-1} & \cdots & \bar{Y}_{2n-1} & \cdots & \bar{Y}_{2N-1} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{n1-1} & \bar{Y}_{n2-1} & \cdots & \bar{Y}_{nn-1} & \cdots & \bar{Y}_{nN-1} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{N1-1} & \bar{Y}_{N2-1} & \cdots & \bar{Y}_{Nn-1} & \cdots & \bar{Y}_{NN-1} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Onde:

- $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$, a matriz de admitâncias equivalentes de sequência positiva, Y-Barra positiva.
- $\bar{Y}_{nn-1}$, a admitância equivalente de sequência positiva na barra n. Também pode ser representada por $\bar{Y}^{+}_{nn}$.

3.4.2 A origem da matriz Y-BARRA negativa

Das considerações realizadas no início deste capítulo, na Seção 3.3, verificou-se que uma falta assimétrica depende dos modelos de sequência positiva, negativa e zero, dando origem às correntes de curto-circuito assimétrico ou correntes das sequências positiva, negativa e zero. As correntes de faltas assimétricas estão atreladas às matrizes de impedâncias equivalentes de Thévenin de sequência positiva, negativa e zero. A corrente de sequência negativa, em particular, está atrelada à matriz $\bar{Z}^{-}_{BARRA}$.

Aplicando-se o mesmo raciocínio da Y-Barra positiva à inversão da Y-Barra negativa, tem-se que ao se inverter uma matriz de admitâncias Y-Barra negativa obtêm-se uma matriz de impedâncias Z-Barra negativa. Dessa forma, uma matriz Y-barra de sequência negativa do tipo $\bar{Y}^{-}_{BARRA}$, com indexação negativa, está atreladada à matriz $\bar{Z}^{-}_{BARRA}$.

Sendo assim, para um sistema elétrico de potência trifásico de N barras, seja ele radial ou em anel, é possível representá-lo atráves de um diagrama unifilar de admitâncias de sequência negativa, e se obter uma matriz Y-Barra negativa, $\bar{Y}^{-}_{BARRA}$, com indexação negativa, como se segue na Expressão 3.10:

$$\bar{Y}^{-}_{BARRA} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11-2} & \bar{Y}_{12-2} & \cdots & \bar{Y}_{1n-2} & \cdots & \bar{Y}_{1N-2} \\ \bar{Y}_{21-2} & \bar{Y}_{22-2} & \cdots & \bar{Y}_{2n-2} & \cdots & \bar{Y}_{2N-2} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{n1-2} & \bar{Y}_{n2-2} & \cdots & \bar{Y}_{nn-2} & \cdots & \bar{Y}_{nN-2} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{N1-2} & \bar{Y}_{N2-2} & \cdots & \bar{Y}_{Nn-2} & \cdots & \bar{Y}_{NN-2} \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Onde:

- $\bar{Y}^{-}_{BARRA}$, a matriz de admitâncias equivalentes de sequência negativa, Y-Barra negativa.
- $\bar{Y}_{nn-2}$, a admitância equivalente de sequência negativa na barra n. Também pode ser representada por $\bar{Y}^{-}_{nn}$.

3.4.3 A origem da matriz Y-BARRA zero

As faltas assimétricas dependem dos modelos de sequência positiva, negativa e zero, dando origem às correntes de curto-circuito assimétrico ou correntes das sequências positiva, negativa e zero. As correntes de faltas assimétricas estão atreladas às matrizes de impedâncias equivalentes de Thévenin de sequência positiva, negativa e zero. A corrente de sequência zero, em particular, está atrelada à matriz $\bar{Z}^{0}_{BARRA}$.

Aplicando-se o mesmo racioncío da Y-Barra positiva e Y-Barra negativa à inversão da Y-Barra zero, tem-se que ao se inverter uma matriz de admitâncias Y-Barra zero obtêm-se uma matriz de impedâncias Z-Barra zero.

Sendo assim, para um sistema elétrico de potência trifásico de N barras, seja ele radial ou em anel, é possível representá-lo atráves de um diagrama unifilar de admitâncias de sequência zero e se obter uma matriz Y-Barra zero, $\bar{Y}^{0}_{BARRA}$, com indexação zero, como se segue na Expressão 3.11:

$$\bar{Y}^{0}_{BARRA} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11-0} & \bar{Y}_{12-0} & \cdots & \bar{Y}_{1n-0} & \cdots & \bar{Y}_{1N-0} \\ \bar{Y}_{21-0} & \bar{Y}_{22-0} & \cdots & \bar{Y}_{2n-0} & \cdots & \bar{Y}_{2N-0} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{n1-0} & \bar{Y}_{n2-0} & \cdots & \bar{Y}_{nn-0} & \cdots & \bar{Y}_{nN-0} \\ \vdots & & & & & \\ \bar{Y}_{N1-0} & \bar{Y}_{N2-0} & \cdots & \bar{Y}_{Nn-0} & \cdots & \bar{Y}_{NN-0} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Onde:

- $\bar{Y}^{0}_{BARRA}$, a matriz de admitâncias equivalentes de sequência zero, Y-Barra zero.
- $\bar{Y}_{nn-0}$, a admitância equivalente de sequência zero na barra n. Também pode ser representada por $\bar{Y}^{0}_{nn}$.

3.5 Obtenção da matriz Z-Barra de N barras via Y-Barra

Uma vez definido o formato e a indexação de Y-Barra e Z-Barra nas seções anteriores, deste capítulo, a seguir, é apresentado de forma breve como obter a matriz de impedâncias equivalentes de Thévenin, Z-Barra, através do método de inversão de matrizes. Para tanto, é utilizada a Regra de Laplace generalizada em conjunto com a matriz adjunta, de Y-Barra, para cálculo da matriz inversa Z-Barra. Com isso, será viabilizado o cálculo matricial de inversão da matriz de admitâncias equivalentes, Y-Barra, de qualquer ordem – o único delimitador neste caso será o alocamento de memória do computador, ou seja, se o *hardware*, no qual o *software* de curto-circuito SHOT-C está sendo executando, vai suportar.

A obtenção de uma matriz inversa, no caso $\bar{Y}^{-1}_{Barra}$, pode ser realizada por metodologias diferentes, em destaque, abaixo, são dados três métodos:

- **Método 1:** uma matriz inversa pode ser obtida pela Regra de Laplace em conjunto com a matriz adjunta (IEZZI; HAZZAN, 2013, p. 130). Este método consiste da formação de dois fatores, um depende da Regra de Laplace (IEZZI; HAZZAN, 2013, p. 91-92), para o cálculo do determinante, e o segundo fator depende da matriz adjunta (IEZZI; HAZZAN, 2013, p. 128);

- **Método 2:** uma matriz inversa pode ser obtida aplicando-se o método de Decomposição LU (*Lower-Upper*) (RUGGIERO; LOPES, 1997, p. 137), sob a equação da matriz dos coeficientes, $A \cdot x = b$. Assumindo-se essa equação equivalente à identidade $\bar{Y}_{Barra} \cdot \bar{Y}_{Barra}^{-1} = I_n$, onde I_n é a matriz identidade;

- **Método 3:** uma matriz inversa pode ser obtida pelo método de Eliminação de Gauss-Jordan (PRESS *et al.*, 1992, p. 36-42), que consiste em estabelecer operações vetoriais com multiplicadores (RUGGIERO; LOPES, 1997, p. 137). Este método está de acordo com a técnica de escalonamento da eliminação gaussiana, para, assim, se obter a matriz inversa. De modo simplificado consiste em operar a relação $I_n \cdot \bar{Y}_{Barra}^{-1} \rightleftharpoons \bar{Y}_{Barra} \cdot I_n$ até que a mesma seja válida, admitindo o lado direito sendo operado até se determinar o lado esquerdo.

Todos os métodos listados são eficientes do ponto de vista computacional, pois o tempo computacional de resolução de uma matriz até 7x7 no *software* SHOT-C, com números reais (desprezando a parte imaginária j), foi menor que 10 segundos (admitindo um valor sobredimensionado). Este tempo é equivalente à clicar no botão do formulário do SHOT-C e automaticamente ser exibido uma janela gráfica com os resultados.

A referência aqui adotada, para o *hardware*, foi um notebook de uso acadêmico, com as configurações mínimas de 4GB de memória RAM e processador core i3 ou Pentium quad core (recomendando-se uma frequência de processador acima de 2GHz).

Com relação a obra *Numerical Recipes in C*, da referência Press *et al.* (1992), esta é um compêndio de resoluções de problemas algébricos aplicados à Linguagem C, de forma pormenorizada, o que pode ser de extrema relevância para uma futura melhoria do *software* SHOT-C. Ademais, a referida obra fornece códigos de como lidar com matrizes inversas, e inclusive com matrizes esparsas, assunto a qual se aplica à matriz $\bar{Y}_{Barra}$, contudo isto não será discutido neste TCC.

Enfim, uma vez definido que é utilizado o método 1, como mencionado no início desta seção, a seguir, é mostrada as expressões de obtenção da matriz inversa e a justificativa do porque a matriz Z-Barra também é simétrica. Encerrando-se assim a fundamentação teórica para implementação do *software* SHOT-C.

3.5.1 Expressões adotadas para cálculo da matriz inversa

Para o **Método 1**, compete se analisar quatro expressões: 3.13, 3.15, 3.18 e 3.19. Estas resumem uma teoria robusta acerca de matrizes (IEZZI; HAZZAN, 2013). É importante enfatizar que as referidas expressões se dividem em dois grupos, de implementação do código-fonte do *software* SHOT-C e, se isso não for bem compreendido, a chance de falha é enorme, visto que a função determinante do código-fonte precisa ser operada **em recursividade** e as demais funções devem operar com tempos sincronizados, rotinas de esgotamento, acúmulo de dados,

incrementos de preenchimento e condicionais. Sendo assim, seguem as expressões, em dois grupos, para cálculo da matriz inversa da Equação 3.12 (ou da Equação 3.13, ou ainda das Equações, detalhadas, 3.14 ou 3.15 – grupo G1):

$$\bar{Y}_{Barra}^{-1} = \bar{Z}_{Barra} \tag{3.12}$$

GRUPO 1 (G1) - Expressão geral para cálculo da matriz inversa:

$$\bar{Y}_{Barra}^{-1} = \bar{Z}_{Barra} = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot \overline{\bar{Y}}_{Barra} \tag{3.13}$$

Onde,

$$\bar{Y}_{Barra}^{-1} = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot \overline{\bar{Y}}_{Barra} = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot (\bar{Y}'_{pq})^T = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot \bar{Y}'_{qp} \tag{3.14}$$

$$\bar{Y}_{Barra}^{-1} = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot \overline{\bar{Y}}_{Barra} = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot (\bar{Y}'_{pq})^T = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot ((-1)^{p+q} \cdot M_{pq})^T \tag{3.15}$$

Onde:

- $\bar{Y}_{Barra}^{-1}$, a matriz inversa de admitâncias equivalentes complexas, ou matriz de Thévenin;
- $det(\bar{Y}_{Barra})$, o determinante da matriz de admitâncias equivalentes complexas;
- $\overline{\bar{Y}}_{Barra}$, a matriz adjunta de admitâncias equivalentes complexas;
- $\bar{Y}'_{pq}$, a matriz de cofatores de admitâncias equivalentes complexas;
- M_{pq}, a matriz para o menor complementar de uma admitância equivalente pq complexa;
- p e q, índices genéricos variáveis, onde $p =$ linha e $q =$ coluna, da matriz;
- T, para matriz transposta.

A partir da equação 3.14 verifica-se que a matriz de Thévenin também é uma matriz simétrica (IEZZI; HAZZAN, 2013, p. 71), como se segue na Equação 3.16:

$$\bar{Z}_{Barra} = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot (\bar{Y}'_{pq})^T = \frac{1}{det(\bar{Y}_{Barra})} \cdot \bar{Y}'_{qp} \quad \left\{ \quad \bar{Z}_{Barra} \text{ é uma matriz simétrica} \right. \tag{3.16}$$

Para a expressão geral, de obtenção da matriz inversa, a Equação 3.15 possui duas camadas de recursividade, onde na camada 1 deve haver esgotamento sobre o menor complementar M_{pq}. Já a segunda camada depende do cálculo do determinante $det(\bar{Y}_{Barra})$, no denominador da Expressão geral 3.13. Contudo, para o cálculo do esgotamento do determinante é importante se evidenciar o GRUPO 2, a seguir, pois a etapa G2.1 é extremamente crítica, sendo o ponto de retorno da recursividade, após cálculo do determinante. A metodologia do GRUPO 2 está descrita como recorência, por Iezzi e Hazzan (2013, p. 88-89), contudo em linguagem teórica; apesar da sua simplicidade, sem isso é impossível de tornar o uso da Regra de Laplace factível.

GRUPO 2 (G2) - Expressões gerais para cálculo do determinante via Regra de Laplace com recursividade, como se segue nas Expressões 3.17, 3.18 e 3.19:

- **ETAPA G2.1**

  CAMADA 2: se $\bar{Y}_{Barra}$ é de ordem = 1×1 (esgotamento), então:

$$det(\bar{Y}_{Barra}) = \bar{Y}_{11} \tag{3.17}$$

  CAMADA 1: para recursividade, se M_{nq} é de ordem = 1×1 (esgotamento), tem-se:

$$det(M_{nq}) = M_{11} \tag{3.18}$$

- **ETAPA G2.2:** se $\bar{Y}_{Barra}$, ou M_{nq} (análogo), é de ordem $\geq 2 \times 2$, então aplicar a Regra de Laplace:

$$det(\bar{Y}_{Barra}) = \sum_{q=1}^{N=10} \bar{Y}_{nq} \cdot M_{nq} \text{ , caso linha.} \tag{3.19}$$

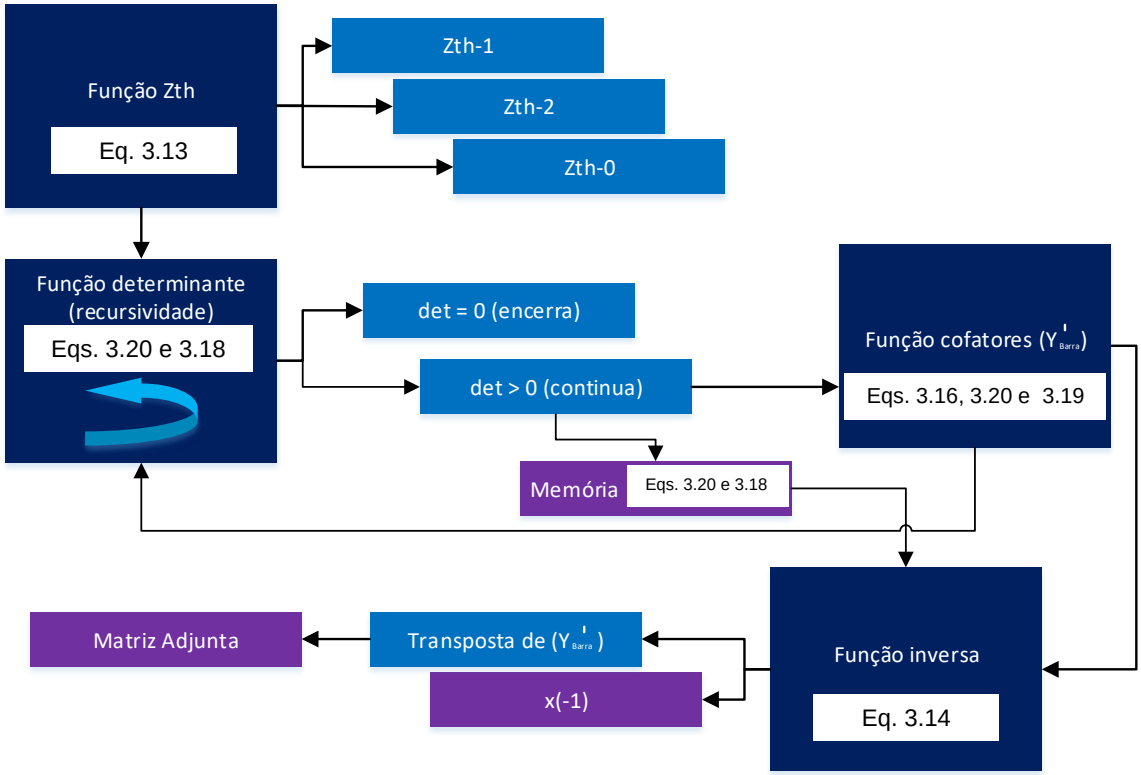
Onde,

- N, número de barras do SEP, no máximo 10 (limitação computacional de tempo);
- n e p, índices genéricos, onde $n =$ linha e $q =$ coluna, da matriz. Assumir qualquer n fixo;
- $det(\bar{Y}_{Barra}) \neq 0$;
- $det(M_{nq}) \neq 0$;

A Figura 24 mostra um fluxograma da integração das expressões do GRUPO 1 e GRUPO 2, para cálculo da matriz inversa Z-Barra (Função Zth). Consequentemente, também é mostrado como as funções operam no código-fonte do SHOT-C, no caso para obtenção da matriz inversa.

Ainda com relação à Figura 24, o bloco superior esquerdo é a primeira função disparada após o clique de um botão de iniciar cálculo de Sequência Positiva (Negativa ou Zero), no formulário do *software SHOT-C* – mais detalhes sobre esse formulário será mostrado no próximo capítulo. Dentro dessa primeira função, a Função Zth, é realizado uma filtragem condicional de qual matriz inversa deseja-se calcular, ou seja, entre $\bar{Z}^{+}_{Barra}$, $\bar{Z}^{-}_{Barra}$ e $\bar{Z}^{0}_{Barra}$, respectivamente, Zth-1, Zth-2 e Zth-0, sem a parte imaginária.

Figura 24 – Fluxograma da matriz inversa – MÉTODO 1.



FONTE: autoria própria (2022)

Uma vez definido qual matriz inversa deseja-se calcular na Função Zth da Figura 24, é iniciado uma cascata automática de disparo de funções, onde a Função Zth chama a Função determinante que, por sua vez, chama a Função cofatores que, por fim, chama a Função inversa.

Contudo, a Função determinante chama a si mesma até o esgotamento (quando o determinante é de ordem 1x1), como mostrado nas Equações 3.17 e 3.18, além disso, essa função é de múltiplos acessos, sendo acessada tanto pela Função Zth, como pela Função cofatores. Dessa forma, a última função coleta o primeiro determinante, realiza a transposição da matriz de cofatores e por fim opera os dois fatores da Equação 3.13, com sinal trocado (por causa da parte imaginária j dos números complexos). E assim calcula a matriz inversa $\bar{Y}^{-1}_{Barra}$ (Z-Barra) pelo **Método 1**.

3.6 Conclusão do capítulo

Neste capítulo tratou-se de apresentar as matrizes de sequências de Z-Barra e Y-Barra, além de uma abordagem dedicada ao calculo da matriz inversa de ordem elevada para se obter a Z-Barra. Após as considerações importantes sobre a tensão de pré-falta, elencou-se diversas conclusões, das quais serviram de suporte para obtenção das matrizes $\bar{Z}^{+}_{Barra}$, $\bar{Z}^{-}_{Barra}$, $\bar{Z}^{0}_{Barra}$, $\bar{Y}^{+}_{Barra}$, $\bar{Y}^{-}_{Barra}$ e $\bar{Y}^{0}_{Barra}$. A formalização dessas matrizes não é apenas um objetivo teórico, mas é crítico que seja apresentado, pois é exatamente isso que o *software* SHOT-C exibe como resultado final em uma das janelas gráficas. Além disso, essas matrizes são o alicerce para cálculo das correntes dos curtos-circuitos simétricos e assimétricos, como apresentadas no Capítulo 2.

Dentre os métodos analisados para resolução de matrizes inversas, foi adotado o **Método 1**, que consiste em obter a matriz de cofatores e o determinante pela Regra de Laplace, para cálculo da matriz inversa. Para cenários com uso de matrizes inversas mais elevadas e matrizes esparsas de Y-Barra recomenda-se a consulta da Obra *Numerical Recipes in C*, da referência Press *et al.* (1992).

4 SOFTWARE SHOT-C

4.1 Introdução

Este capítulo visa apresentar o SHOT-C, um *software* de uso acadêmico para curtos-circuitos. A nomenclatura desse *software* é uma abreviação derivada de uma combinação do inglês: *Short Circuit* com *C Language*, que significa curto-circuito em linguagem C. A seguir, é apresentado como foi concebido o SHOT-C, a metodologia, quais ferramentas foram utilizadas para sua concepção, quais foram os maiores problemas e como contorná-los. Ao final é mostrado como é realizado a inserção de dados e como são exibidos os resultados.

4.2 Arcabouço do desenvolvimento de *software* para curtos-circuitos

O embasamento teórico para o desenvolvimento do *software* foi obtido por estudo da teoria de componentes simétricas e suas aplicações ao SEP, cálculos estes que permitam identificar as contribuições de falta em diferentes barras simultaneamente. Com respeito a parte gráfica do *software* foi utilizado a biblioteca gráfica brasileira[1] chamada IUP©, desenvolvida pela TECGRAF-Rio (TECGRAF/PUC-RIO, 2020). Complementar a esta biblioteca tem-se as bibliotecas gráficas CanvasDraw© e IM©, ambas desenvolvidas pela TECGRAF, além da biblioteca gráfica OpenGL® administrada por um consórcio de 150 empresas denominado The Khronos Group (The Khronus Group, 2022). As bibliotecas desenvolvidas pela TECGRAF são fornecidas sob a licença MIT - sigla advinda de seu autor/criador, o Instituto de Tecnologia de Massachusetts, do inglês *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

Assim, por causa da licença MIT, as bibliotecas são de uso permissível para aplicações comerciais ou não-comerciais, sem a necessidade de desembolso, requerendo apenas tomar as devidas cautelas legais para garantir autoria da obra. Enquanto isso, a biblioteca gráfica OpenGL não é exatamente uma biblioteca com instruções como são as bibliotecas da Tecgraf, a OpenGL é de apenas especificações de padrões adotado pela indústria da computação gráfica (The Khronos Group, 2022). A OpenGL já está integrada às bibliotecas da Tecgraf, mas é importante frisar a possibilidade de uso de outras bibliotecas que possuem a OpenGL, como é o caso da GLU e da GLUT, respectivamente, Biblioteca de utilitários OpenGL, do inglês *OpenGL Utility Library* (GLU) e Kit de ferramentas do utilitário OpenGL, do inglês *OpenGL Utility Toolkit* (GLUT), que permitem a criação de objetos geométricos em 2D, 3D e interfaces gráficas com outras características.

O *software* SHOT-C é uma ferramenta computacional que visa ser de cunho privativo ou comercial, e é por isso que o *software* é dito *software* proprietário, ou seja, embora esteja se utilizando de um licença permissível, após a conclusão da obra é possível licenciar o produto com

[1] Produto em linguagem C patenteado junto ao INPI sob o número de pedido 07569-0 em 2006.

direitos reservados, isso permite um maior respaldo e segurança tanto para o desenvolvedor quanto juridicamente para o comprador. A escolha também se deu em virtude da biblioteca ser compatível com a linguagem de programação C, linguagem esta que é difundida livremente em toda comunidade acadêmica sem restrições, além de ser uma linguagem muito utilizada pelos profissionais de engenharia em diferentes áreas.

4.3 Viabilidade de uso e expansão no meio acadêmico

O executável do *software* SHOT-C está disponível para comunidade acadêmica em servidor seguro e de livre acesso, o drive da UTFPR. O executável (arquivo .exe) já está estável e fundamento por este TCC. Além disso, foi disponibilizado o código fonte do SHOT-C em sua íntegra para estudo. Assim, acadêmicos ou profissionais de proteção tendo posse tanto do executável estável como do código fonte terão maior autonomia para estudar, testar e criar os diversos cenários de SEP em curto-circuito. Dessa forma, busca-se fazê-los entender como os elementos do SEP se comportam durante um curto-circuito, em particular em curto-circuitos assimétricos.

A expectativa desse desenvolvimento é fornecer uma nova aplicação computacional expansível, com curva de aprendizado rápida e comercializável sem oneração. Assim espera-se que ampliando o conhecimento preexistente sobre curtos-circuitos, seja possível colaborar no atendimento às demandas sociais e empresariais de melhor qualidade do sistema elétrico de potência.

O *software* SHOT-C versão 1.0, não possui parâmetros que garantam atenuação dos índices DEC/FEC ou mitigue qualquer tipo falta em qualquer sistema real, o mesmo foi desenvolvido para ser disponibilizado como ferramenta de estudo, sendo assim o software de curto-circuito não está limitado a nenhuma norma técnica de nenhuma concessionária. Contudo, o mesmo possui capacidade de inserção de equipamentos em tensões padronizadas de 13,8 kV, 34,5 kV, 69 kV, 138 kV, 230 kV e 750 kV por exemplo, ou qualquer outro valor de tensão.

De forma resumida o *software* foi desenvolvido sob o espectro de linhas de transmissão/subtransmissão/distribuição, tipos de enrolamento e de núcleos dos transformadores de dois enrolamentos, geradores e motores síncronos; e sob espectro da análise de matrizes de sequência de admitância, matrizes de sequência de Thévenin, componentes simétricas, entradas em valores reais e conversão de impedância e admitâncias em pu. As impedâncias consideradas foram apenas as reatâncias complexas, não se considerando a parte real (resistências).

Já em relação a sua capacidade de expansão para aplicações reais, o *software* foi pensado para abarcar funcionalidades tais como múltiplas janelas (usabilidade em múltiplas telas) – funcionalidade já aplicada, leitura de banco de dados, saída customizada de dados, gráficos 2D e 3D, desenhos de diagramas de sequência, geoprocessamento, além de um upgrade da linguagem C para linguagem C++. Contudo todas essas melhorias requerem um tempo de processamento e desenvolvimento muito elevado, não cabendo ao escopo deste TCC.

4.4 Aplicação da metodologia de desenvolvimento de *software* sobre o SHOT-C

4.4.1 Desenvolvimento de *software* enxuto - Método Ágil *LEAN*

A metodologia usada para o desenvolvimento do *software* SHOT-C foi estabelecida como uma metodologia ágil baseada em manufatura *LEAN* (tradução livre do inglês: ENXUTA) – análogo ao Modelo Toyota de Produção (PINTO, 2011; POPPENDIECK; POPPENDIECK, 2003). Este método consiste de um paralelo à metodologia de fabricação Toyota (GHINATO, 1995; LIKER; CONVIS, 2013), onde de acordo com Poppendieck e Poppendieck (2003, p. 24) o desenvolvimento de um *software*, baseado na metodologia *LEAN*, se assemelha ao pensamento "na hora certa", do inglês *just-in-time* (JIT), pioneiro da Toyota, que consiste em "não decida o que fabricar até que se tenha um pedido do cliente", ou seja, para se eliminar os desperdícios de produção é preciso ter bem estabelecidos as premissas daquilo que se deseja fabricar.

De acordo com Liker e Convis (2013, p. 82), o Sistema Toyota de Produção é baseado em dois pilares, onde o primeiro é o JIT, e o segundo pilar é o *jidoka*, onde este consiste de um pensamento de "Pare e corrija os problemas", assim, com esses pilares fundamentais, e com a melhoria contínua de pessoas e a manutenção preventiva de equipamentos, é possível garantir a excelência operacional no Sistema Toyota de Produção. Baseando-se nesses pilares e princípios é que Poppendieck e Poppendieck (2003) propus, através da obra intitulada "*Lean Software Development: An Agile Toolkit*", a filosofia de desenvolvimento de *software* denominada "*Lean Software Development*", onde, nessa obra, se discute em 7 capítulos os princípios da *LEAN*, onde cada capítulo é dedicado a um princípio de como traduzir ferramentas de pensamento em práticas ágeis de desenvolvimento de *software*.

Sendo assim, a filosofia adotada, no desenvolvimento do *software* SHOT-C, foi a metodologia ágil baseada em manufatura enxuta. A filosofia *LEAN* é um "guarda-chuva" constituído de 7 fatias propositivas, como mostrado na Figura 25, à seguir, que em resumo, orienta-se à criação de um programa de computador baseado em:

1) *Eliminar desperdícios*, identificando falhas e suprimindo-as;

2) *Amplificar aprendizado*, este é o ponto mais forte da metodologia, é preciso se aprofundar, no problema que deseja-se solucionar, de fato;

3) *Repensar compromisso*, construir a ideia baseada em fatos e não em suposições, ou seja, decida o mais tarde possível;

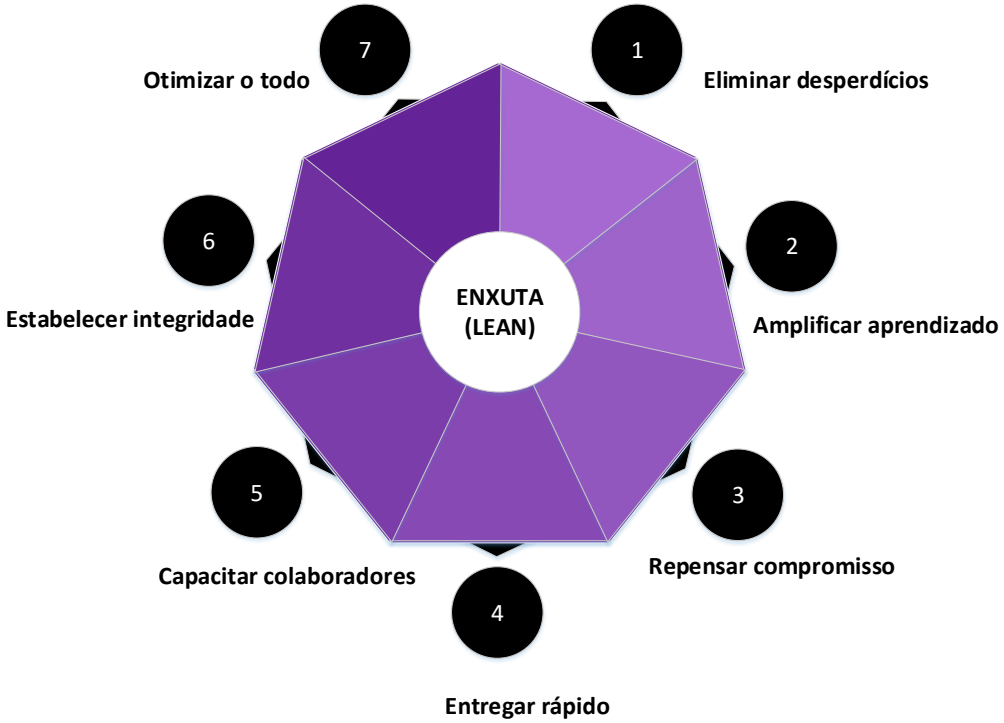
4) *Entregar rápido*, quanto mais cedo a aplicação for disponibilizada, de forma estável, melhor será o *feedback* do usuário final. Assim o ciclo de vida, de novas incorporações à aplicação, se torna sustentável;

5) *Capacitar colaboradores*, do ponto de vista acadêmico, tem-se que novos usuários terão acesso à aplicação, assim capacitando-os;

6) *Estabelecer integridade*, garantir que o sistema é funcional, eficiente, capaz de receber manutenção e possuir pontos de contigências;

7) *Otimizar o todo*, é a capacidade de pensar macro, e compreender como a ferramenta poderá ser melhorada futuramente;

Figura 25 – Filosofia de desenvolvimento do *software* SHOT-C



FONTE: autoria própria (2022)

4.4.2 Janela inicial do SHOT-C

A Figura 26 mostra uma das interfaces de usuário criada para o software SHOT-C, sendo esta a janela/interface principal ou inicial. A partir desta interface principal são geradas as demais interfaces de usuário, tais como o formulário de dados, as planilhas de impedâncias equivalentes de Thévenin e a calculadora de correntes de faltas. Graças à linguagem C e a biblioteca de interfaces de usuário IUP, é possível automatizar a coleta de dados informada pelo usuário, processar esses dados e exibí-los em outra interface gráfica. Todas as interfaces do *software* SHOT-C são independentes e podem ser utilizadas em múltiplas telas, estando compatível com a modalidade de uso de programas de computadores em segunda tela ou múltiplas telas, visando maior agilidade e operação múltipla com vários programas de computador no sistema operacional. Ademais, cabe destacar que o *software* SHOT-C foi criado nos moldes de interfaces gráficas responsivas. Ou seja, interfaces responsivas são janelas capazes de autorredimensionar à qualquer tela e a qualquer sistema operacional, caso contrário o *software* já “nasceria” obsoleto.

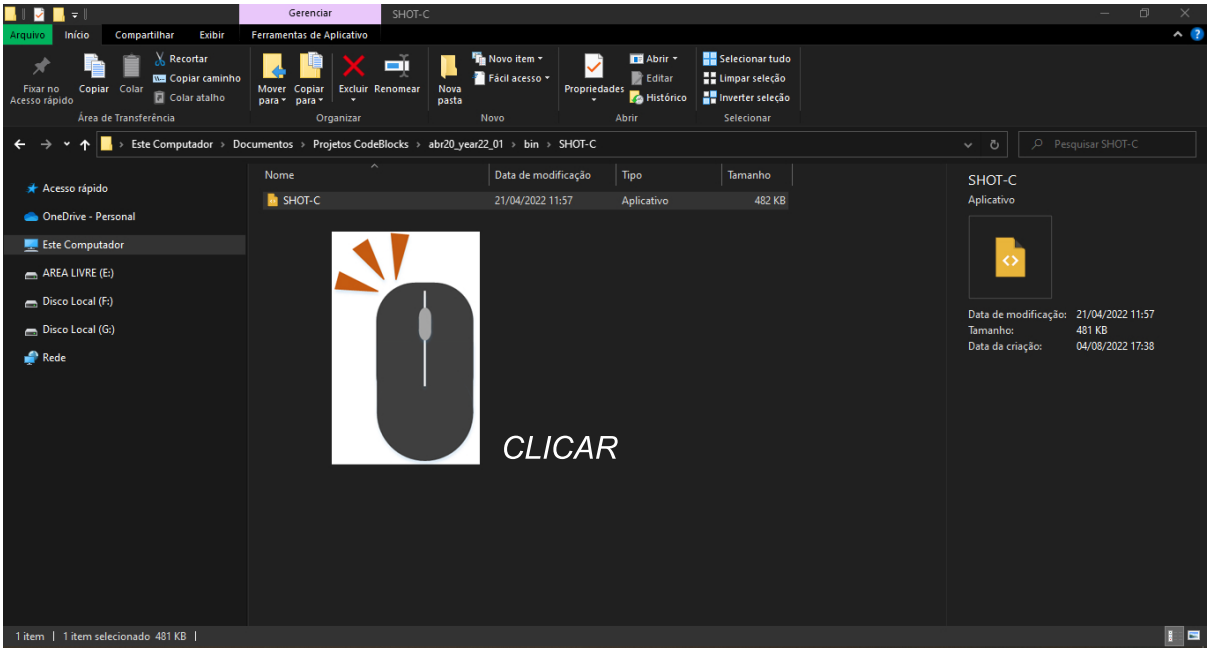
Figura 26 – Interface Gráfica de Usuário do SHOT-C

FONTE: autoria própria (2022)

4.4.3 Fluxograma de entrada de dados

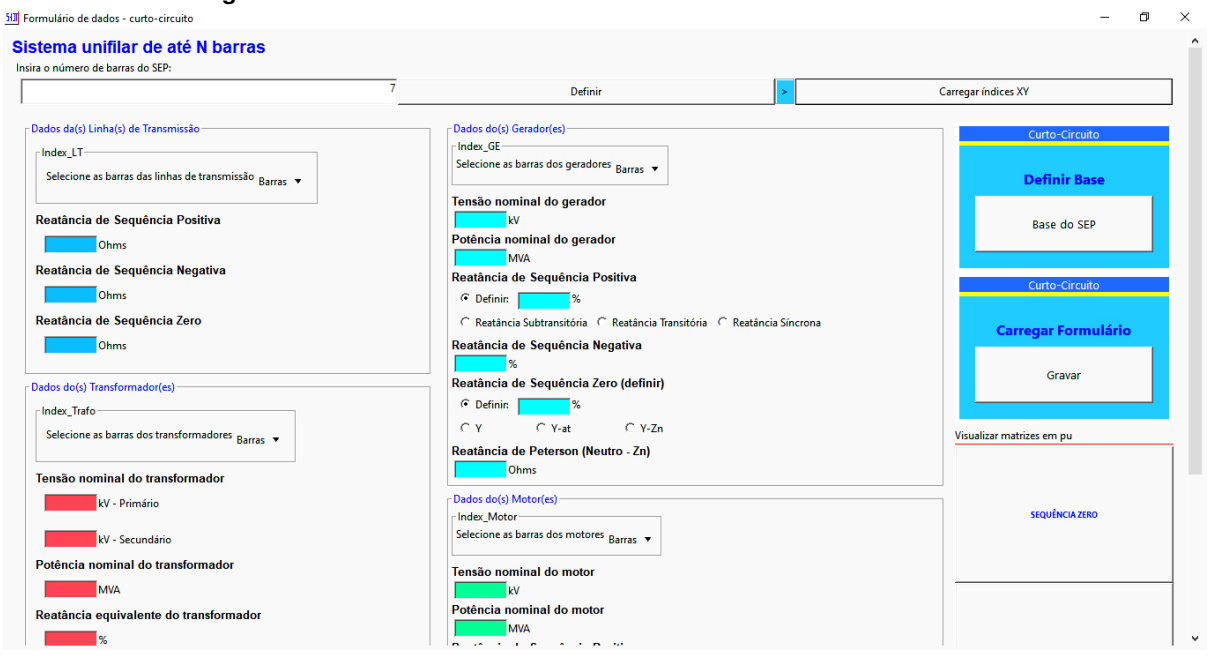
O SHOT-C, como dito anteriormente, possui diversas janelas gráficas, sendo a principal àquela mostrada na Figura 26, na Seção 4.4.2, que é inicializada ao se clicar no executável, como mostrado na Figura 27. Assim, ao se clicar em “Preencher Formulário”, na janela principal, surge uma interface gráfica com os elementos do SEP como mostrado na Figura 28, sendo eles: LTs, Geradores, Transformadores e Motores. Realizado o preenchimento, o usuário deve clicar nos botões de “Base do SEP” e em seguida “Carregar Formulário”. O fluxograma do SHOT-C é mostrado na Figura 29, mostrando-se o fluxo para o cálculo de Y-Barra, de Z-Barra e das correntes de curto-circuito. Os valores de entrada são os dados de placa dos equipamentos, que depois são convertidos em p.u. (por unidade).

Figura 27 – Executável do *software* SHOT-C



FONTE: autoria própria (2022)

Figura 28 – Interface Gráfica de Usuário do Fórmulário do SHOT-C

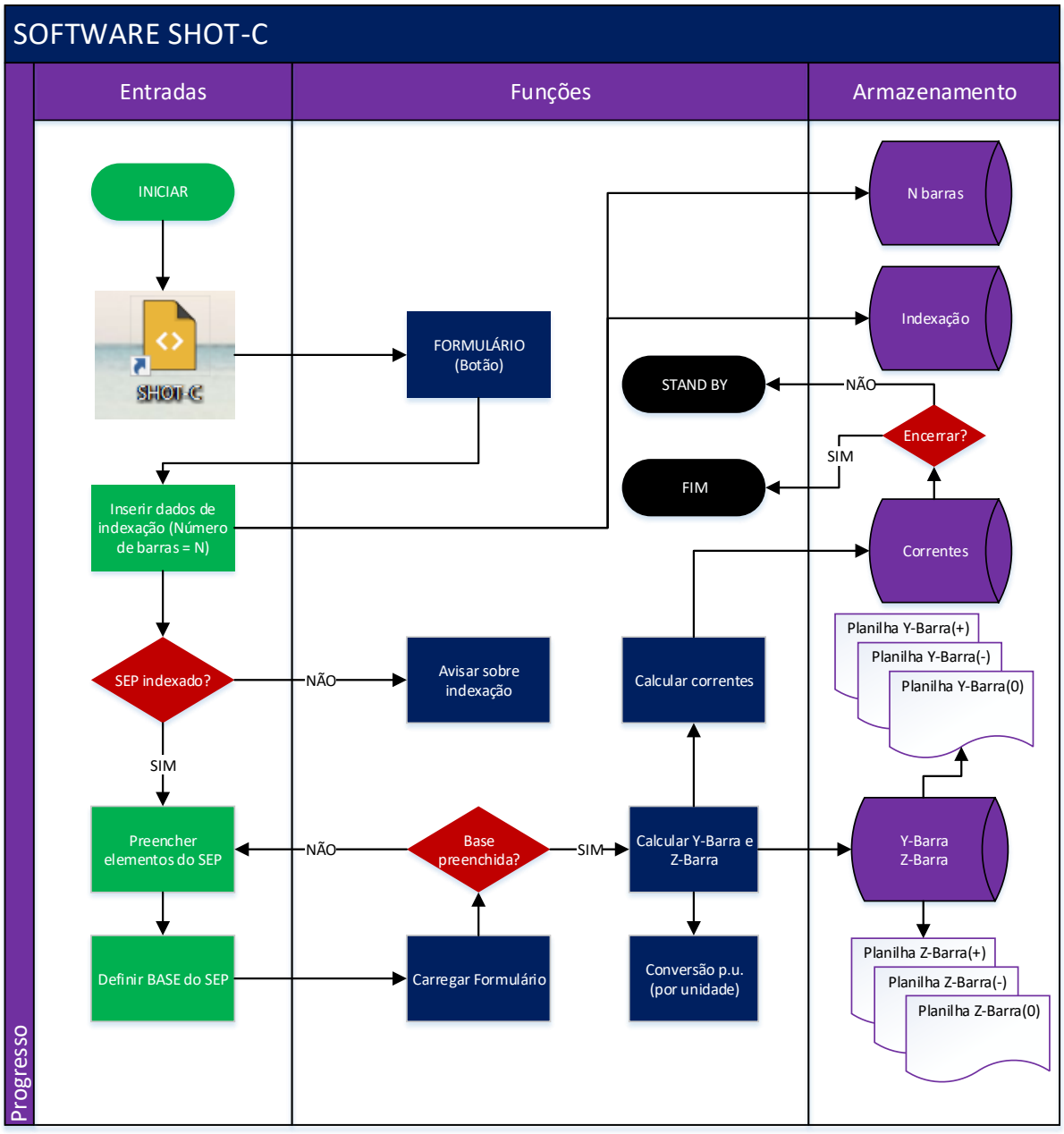


FONTE: autoria própria (2022)

A seguir, na Figura 29, é mostrado o fluxograma de uso e de tempo de execução do *software* SHOT-C. Dividiu-se o fluxograma em três “raias” verticais, onde a parte de preenchimento de dados, a “raia 1” (à esquerda), fica à cargo do usuário. Já as partes de cálculo, de processamento e de armazenamento, nas “raias” 2 e 3, à direita, são executadas pelo *software* SHOT-C.

Ainda na janela Formulário, Figura 28, no canto inferior direito dessa janela é possível acessar as 6 planilhas com as impedâncias e as admitâncias já calculadas em p.u. (por-unidade), como mostrado no canto inferior direito do fluxograma da Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma do *software* SHOT-C



FONTE: autoria própria (2022)

4.5 Problemas encontrados no desenvolvimento do SHOT-C

O desenvolvimento do *software* SHOT-C trouxe alguns problemas que foram mais complexos de se resolver, entre estes pode-se citar:

- O isolamento de barras (barras sem conexão com outras barras) nos diagramas de sequência zero, devido a presença de enrolamentos de ligação delta e/ou estrela dos transformadores como de máquinas síncronas;
- O isolamento de ramais (linhas) nos diagramas de sequência zero;
- Um marcador de parada para sistemas em anel nos diagramas unifilares de sequência positiva, negativa e zero. Caso contrário o *software* colapsa em *loop*.

Sendo assim, observa-se que o curto-circuito trifásico (ou simétrico) é o mais fácil de se calcular dentre todos os curtos, pois os curtos assimétricos dependem não só de marcadores de parada em sistemas em anel, mas também de diagramas de sequência zero com possibilidade de isolamento de barras ou ramos.

4.6 Conclusão do capítulo

Neste capítulo, focou-se em apresentar a metodologia utilizada no **Desenvolvimento de *Software*** do SHOT-C de forma pormenorizada, pois à medida que foi se incrementando o código-fonte muitas dúvidas começaram a surgir, e falhas incompreensíveis só foram suprimidas sendo fiel à metodologia adotada. Ressaltando-se que a metodologia adotada tem como premissa, em destaque, a fatia 3/7, das propositivas elencadas na seção 4.4.1: *construir a ideia baseada em fatos e não em suposições, ou seja, decida o mais tarde possível*.

5 RESULTADOS DE TESTES – SIMULAÇÃO DE UNIFILARES

5.1 Introdução

Este capítulo visa mostrar os resultados obtidos do *software* SHOT-C, advindos de uma sequência de testes. Utilizou-se diagramas unifilares diversificados do sistemas elétricos de potência (SEPs) para compor um conjunto de vários unfilares e, com este conjunto, foram realizados vários testes. O objetivo da bateria de testes foi simular estes unifilares com configurações particulares, para validar o *software* SHOT-C, tanto para os sistemas em anel, quanto para os radiais.

Ao todo foram utilizados 15 unifilares, de no mínimo 4 barras e de no máximo 10 barras, a quantidade mínima visa estabelecer a conexão de pelo menos um gerador síncrono, uma linha de transmissão e pelo menos um transformador de 2 enrolamentos, já a quantidade máxima deve-se à condição de estabilidade do SHOT-C, pois, como dito na Introdução do Capítulo 3, não se estabeleceu técnicas de otimização de inversão de Y-Barra. Embora a quantidade de 4 barras seja pequena, é possível, contudo, obter diversas combinações em anel e radial. Para tanto, utilizou-se de um planejamento baseado em etiquetação, iniciando-se com a palavra *SYSTEM*, e à frente desta é inserido o número que representa a quantidade de barras e a letra que representa a referência alfabética, para distinguir unifilares de mesma quantidade de barras.

Dentre os 15 unifilares simulados, são mostrados os resultados obtidos com 2 unifilares e que serviram para validar o *software* SHOT-C. O primeiro serviu para validar um sistema em anel, enquanto que o segundo serviu para validar o curto-circuito assimétrico. Os referidos resultados foram fundamentados na literatura de curto-circuito, sendo possível consultar as referências bibliográficas e confirmar os cálculos e conclusões. Os detalhes pertinentes aos 2 unifilares para validação são:

1) SYSTEM_7K ou SYSTEM 7K - unifilar com falta monofásica à 70% de uma linha de transmissão entre as barras 2 e 4. Esse unifilar inicialmente foi apresentado por Kindermann (2018, p. 173-189) contendo apenas 6 barras, contudo, a ideia é mostrar a versatibilidade do software ao se admitir uma nova barra num ponto genérico do SEP, assim sendo, é possível obter os mesmos resultados da referência para o referido curto-circuito com uma margem de erro menor do que 1%;

2) SYSTEM_5A ou SYSTEM 5A - unifilar sem a presença de transformadores, com somente linhas de transmissão e geradores, sendo este a representação de um SEP em anel com duas malhas. O referido unifilar foi simulado por Carvalho e Kikuchi (2015, p. 59-63) e essa simulação está de acordo com a norma IEC 60909-0:2001. A margem de erro dos resultados em comparativo é menor do que 1%. Importante enfatizar que os dados de entrada são valores reais em unidades, contudo é possível assumir entradas em pu para LTs, bastando, para tanto, lançar a base igual a 1 [pu] na tensão

base e potência de base, e assumir os valores percentuais de reatância das máquinas síncronas multiplicando-se por 100 o valor em pu.

Em relação ao unifilar SYSTEM_5K, foi apresentado somente a sequência positiva de Y-Barra e Z-Barra, assim, de forma breve, validando-se os valores de acordo com Carvalho e Kikuchi (2015, p. 59-69). Já para o unifilar SYSTEM_7K foi obtido as três matrizes de Z-Barra, mostrando que a matrizes fornecem uma solução completa das impedâncias equivalentes em todas as barras e no ponto de falta à 70% da LT, assim como os valores obtidos por Kindermann (2018, p. 180).

5.2 Unifilar SYSTEM 5A

O unifilar de 5 barras, representando um sistema em anel de 2 malhas é mostrado na Figura 30, com as barras identificadas de 1 a 5, além da presença dos geradores G1 e G2. Os dados do SYSTEM 5A são mostrados na Tabela 1, lembrando que as resistências não foram consideradas nas impedâncias do SEP SYSTEM_5A. A Figura 31 mostra o unifilar de admitâncias equivalentes com indexação associada às cinco barras do SEP, assumindo-se já convertidas em p.u.

Tabela 1 – Dados gerais do SYSTEM 5A

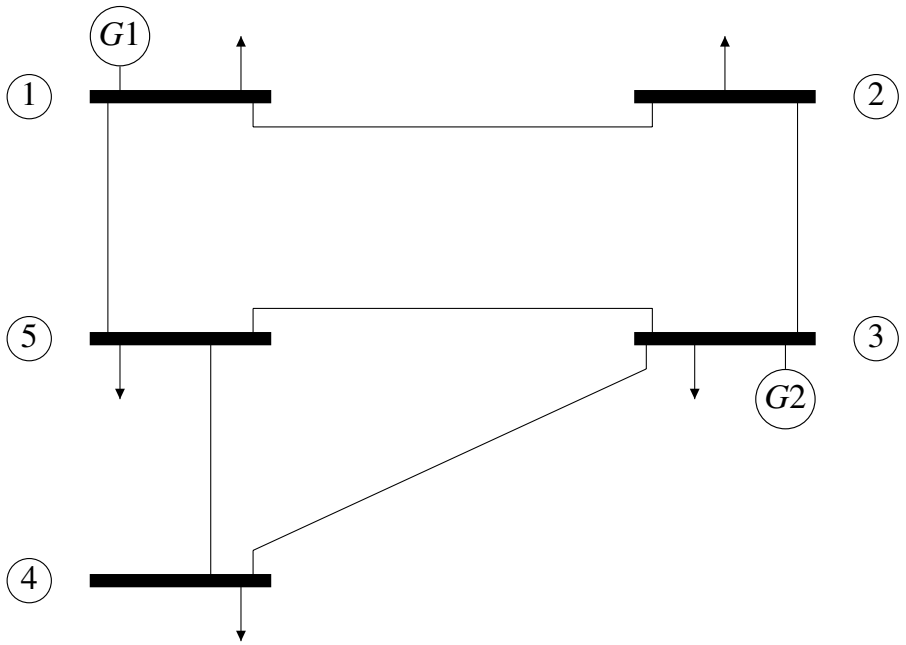
Linha para a barra	**Comprimento** km	milha	**R** Ω	**X** Ω	**R** por-unidade	**X** por unidade
1-2	64,4	40	8	32	0,042	0,168
1-5	48,3	30	6	24	0,031	0,126
2-3	48,3	30	6	24	0,031	0,126
3-4	128,7	80	16	64	0,084	0,336
3-5	80,5	50	10	40	0,053	0,210
4-5	96,5	60	12	48	0,063	0,252

Fonte: Carvalho e Kikuchi (2015, p.60)

Os dados foram lançados ao Formulário do *software* SHOT-C, usando uma base de $100MVA$ e $138kV$ na barra 2, mas poderia ser qualquer barra (por causa da ausência de transformadores). Os dados dos geradores 1 e 2, que devem ser lançados no Formulário do SHOT-C, são de potência nominal de 270 e de 225 MVA, respectivamente, além de 30% de reatância subtransitória para cada um deles, com tensão nominal de $138kV$.

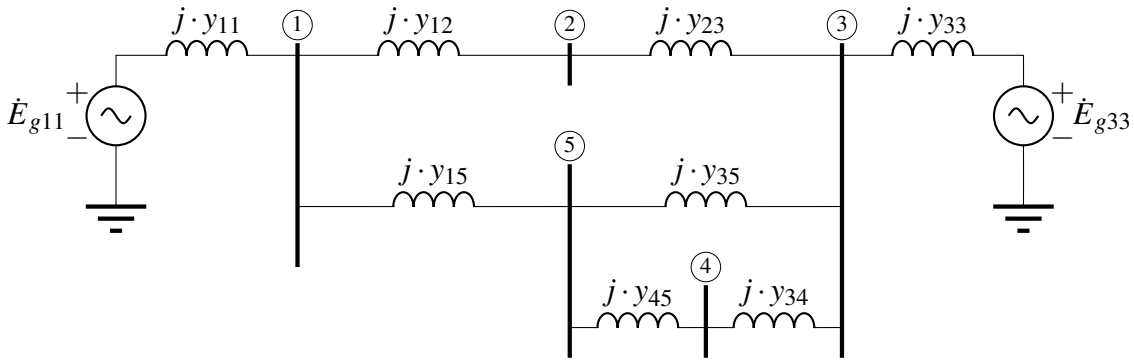
Analisando a Tabela 1 é possível coletar os dados de impedância complexa das linhas de transmissão. Assim, com os dados das linhas, geradores e base, é possível preencher o Formulário do SHOT-C e calcular Y-Barra e Z-Barra.

Figura 30 – Circuito unifilar SYSTEM 5A



FONTE: baseado em Carvalho e Kikuchi (2015, p. 60)

Figura 31 – Diagrama de admitâncias SYSTEM 5A



FONTE: adaptado de Carvalho e Kikuchi (2015, p. 61)

As figuras 32, 33, 34 e 35, são os *printscreens* relativos ao preenchimento do Formulário considerando um sistema de 5 barras e as entradas de dados, respectivamente, de uma LT, de um gerador e da base para o SYSTEM 5A. Com relação a sinalização adotada, por meio de setas coloridas, em todos *printscreens* do SHOT-C, neste capítulo, serve para chamar atenção de ações que foram realizadas para uso do SHOT-C, aplicado na resolução dos diagramas unifilares SYSTEM 5A e SYSTEM 7K. As setas coloridas, de mesma cor, buscam evidenciar:

- botões do tipo ação, estes servem para disparar uma função de marcador, ou seja, fechamento de circuito lógico, bem como armazenamento, cálculo e avisos;

- botões do tipo lista, estes servem para carregar os dados de uma máquina síncrona, uma LT ou de um transformador, para tanto, basta clicar na indexação X:Y da lista;
- uma barra de rolagem, requerendo-se a maximização da janela de uma planilha, ou arrastar a barra de rolagem para visualização dos demais elementos dessa planilha, se houverem;
- janelas suspensas (ou avisos), estas estão sobrepostas ao Formulário do SHOT-C ou à janela inicial;
- uma janela que foi minimizada no canto inferior esquerdo do SHOT-C e não do sistema operacional;
- uma ação que deve ser executada como, por exemplo, clicar em “Definir” ou clicar em “Ok”;
- uma aba e seu correspondente botão, que estão ativos, evidenciando-se, também, a ordem da planilha (matriz) e dos elementos simétricos;
- caixas de inserção de dados reais dos elementos do SEP;
- caixas de resultados calculados pelo SHOT-C, estes passíveis de serem copiados;
- um seletor de escolha única, chamado de *toggle*, para definição de ligações;
- um texto importante, este referenciando o que se busca calcular, ou um texto informativo;
- um agrupamento de informações de dados a serem inseridos ou de resultados obtidos.

Por fim, as setas de 5 pontas servem para evidenciar a delimitação da região do Formulário do SHOT-C destinado ao preenchimento de um elemento do SEP, a esta região é denominada de *frame*. As setas maiores buscam evidenciar o que é mais importante para objetivo desse TCC, como, por exemplo, Y-Barra e Z-Barra, em contraste com as matrizes de impedâncias em pu, que representam os dados inseridos pelo usuário, agora convertidos em pu. Os circulares em vermelho servem para evidenciar a autonomia de indexação de barras no SHOT-C, tanto para definição da barra de base do SEP, como para definição do elemento SEP na barra ou entre barras. Além disso, elementos circulados em vermelho nas Figuras 57, 58 e 59 mostram a barra de curto-circuito e o valor de Zth (impedância equivalente de Thévenin) na barra de curto-circuito, célula da planilha (matriz). Os circulares em verde servem para evidenciar resultados de acordo com a teoria. Para mais detalhes sobre o SHOT-C, é fornecido um manual de uso no Apêndice A.

A Figura 32 sinaliza em vermelho que foi digitado 5 barras para o SEP, contudo é necessário apertar os botões virtuais “Definir” e “Carregar índices XY” e, após isso, o status da

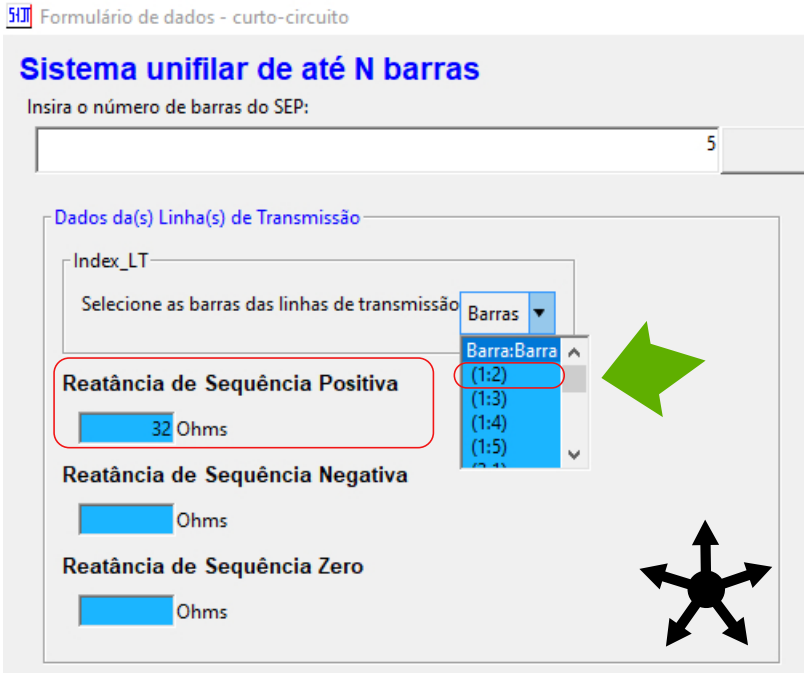
lista do *frame* (região delimitada como a indicada pela seta de 5 pontas) passa de “index_OFF” para “index_ON” e, por fim, exibe os índices possíveis e permitidos para o elemento do SEP. No caso da LT, esta receberá a lista em ordem crescente das possíveis indexações de linhas que se deseja lançar para um SEP de 5 barras, como mostrado na Figura 33. A limitação do *software* SHOT-C permite apenas uma LT entre barras.

Dessa maneira, o diagrama mostrado na Figura 31 tem aplicação direta no lançamento do Formulário, ou seja, utiliza-se o diagrama unifilar indexado para realizar o lançamento dos elementos do SEP. Ao correr a lista “index_LT” é possível selecionar os pares de índices das linhas existentes entre barras.

Figura 32 – Entrada do número barras do SYSTEM 5A no Fórmulário do SHOT-C

FONTE: autoria própria (2022)

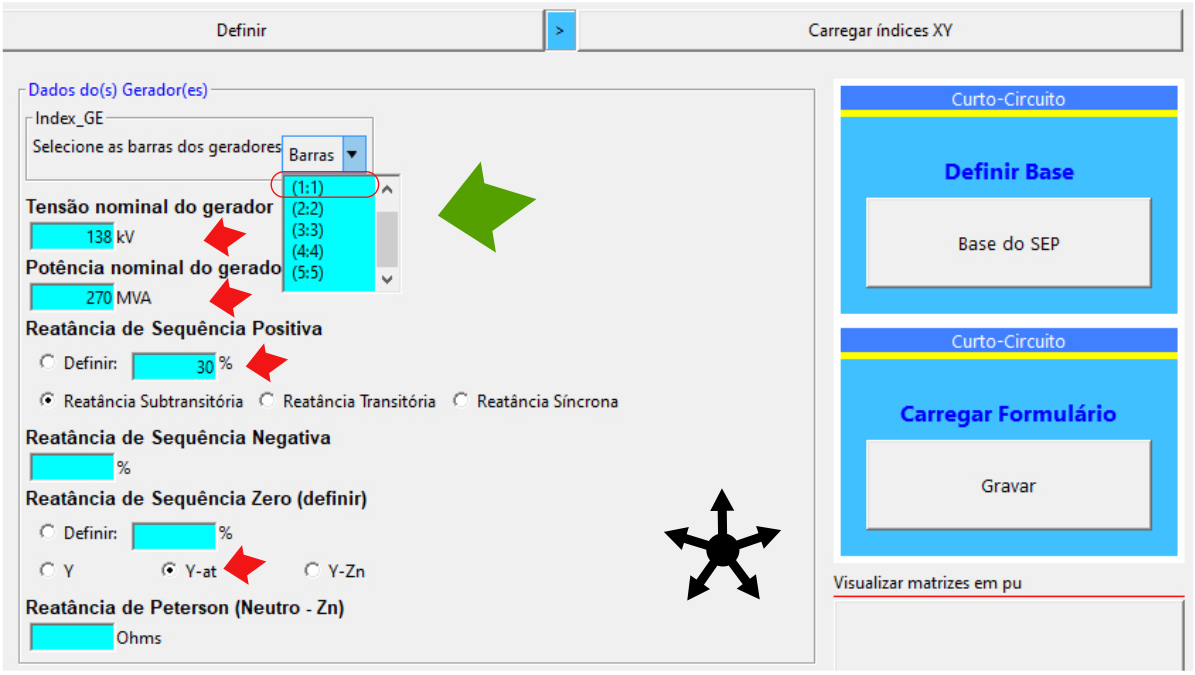
Figura 33 – Entradas no Fórmulário do SHOT-C para as LTs do SYSTEM 5A



FONTE: autoria própria (2022)

As máquinas síncronas geradoras (GEs), recebem uma lista em ordem crescente das possíveis indexações de geradores que se deseja lançar para um SEP de 5 barras, como mostrado na Figura 34. A limitação do *software* SHOT-C permite apenas uma máquina síncrona por barra.

Figura 34 – Entradas no Fórmulário do SHOT-C para as GEs do SYSTEM 5A

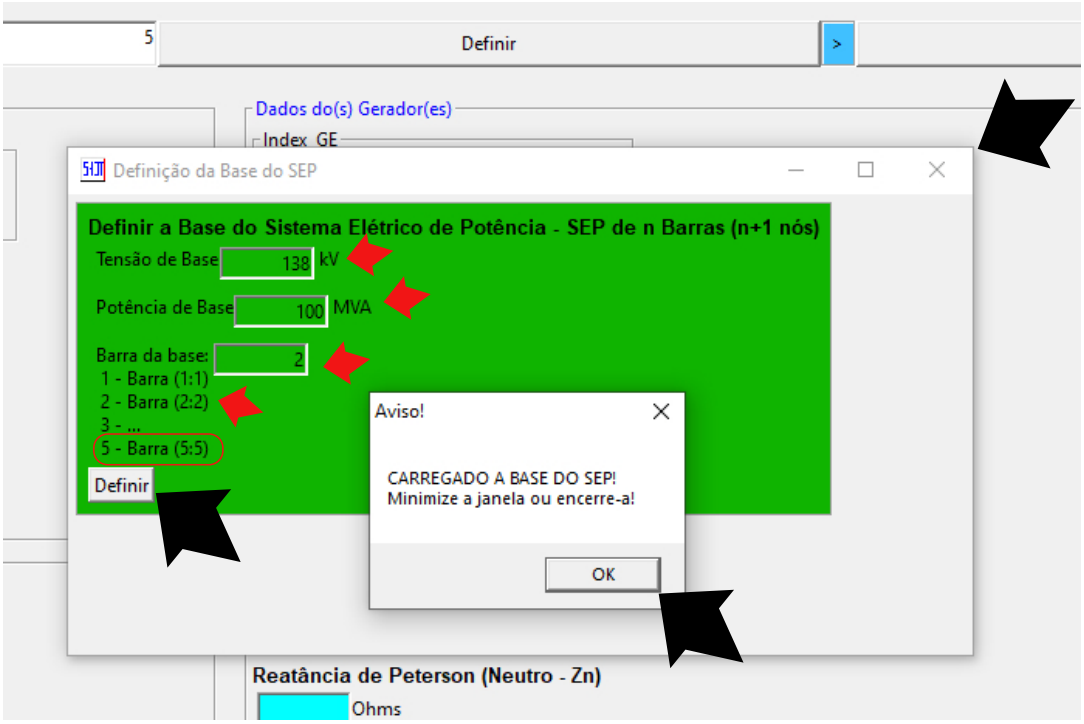


FONTE: autoria própria (2022)

Note que a indexação das máquinas síncronas da Figura 31 é feita com numeração duplicada. Se houver uma barra 10, então haverá uma indexação 1010. Ademais, ainda na referida figura é possível verificar que os elementos de admitância estão em letras minúsculas (por exemplo: $\bar{y}_{11}$), pois a admitância Y de indexação nn da Y-Barra são letras maiúsculas (por exemplo: $\bar{Y}_{11}$), como discutido na definição de Y-Barra.

Por fim, para definir a base do sistema estudado, é preciso apertar o botão “Base do SEP” no *frame* em azul, que fica à direita do Formulário do SHOT-C. Ao clicar neste botão, se abrirá uma interface gráfica de usuário sobreposta ao Formulário, então nesta é informado a quantidade de barras associado ao número de barras lançadas, podendo ser lançado a base em qualquer barra, independente da presença ou não de transformador. O lançamento da base é mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Entradas no Fórmulário do SHOT-C para a base do SYSTEM 5A

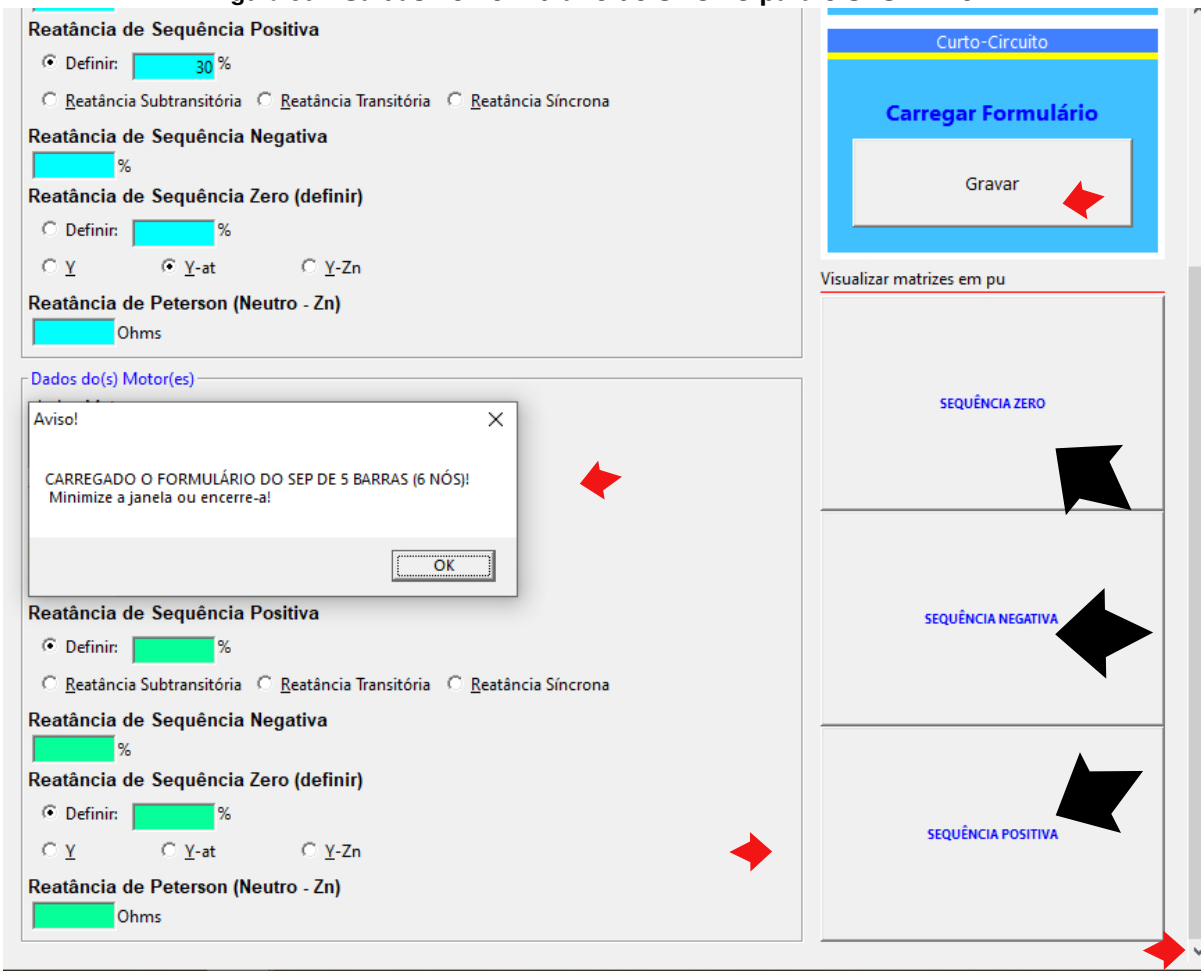


FONTE: autoria própria (2022)

5.2.1 Unifilar SYSTEM 5A - Resultados finais

A Figura 36 mostra a região inferior direita do Formulário do SHOT-C, sinalizado com as setas maiores em preto. Para obtenção da $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$ e $\bar{Z}^{+}_{BARRA}$, deve-se apertar no botão virtual “Sequência positiva” na referida região após carregado o Formulário, ou seja, após clicar no botão “Carregar Formulário” no *frame* azul à direita, para tanto, basta seguir a sinalização das setas em vermelho da Figura 36. Deve ser ignorado qualquer mensagem não pertinente à sequência positiva. Após isso será ascendido uma interface gráfica de usuário contendo três planilhas nativas, podendo ser alternadas usando os botões da lateral esquerda ou clicando-se nas abas das respectivas planilhas ao centro, como mostrado na Figura 37.

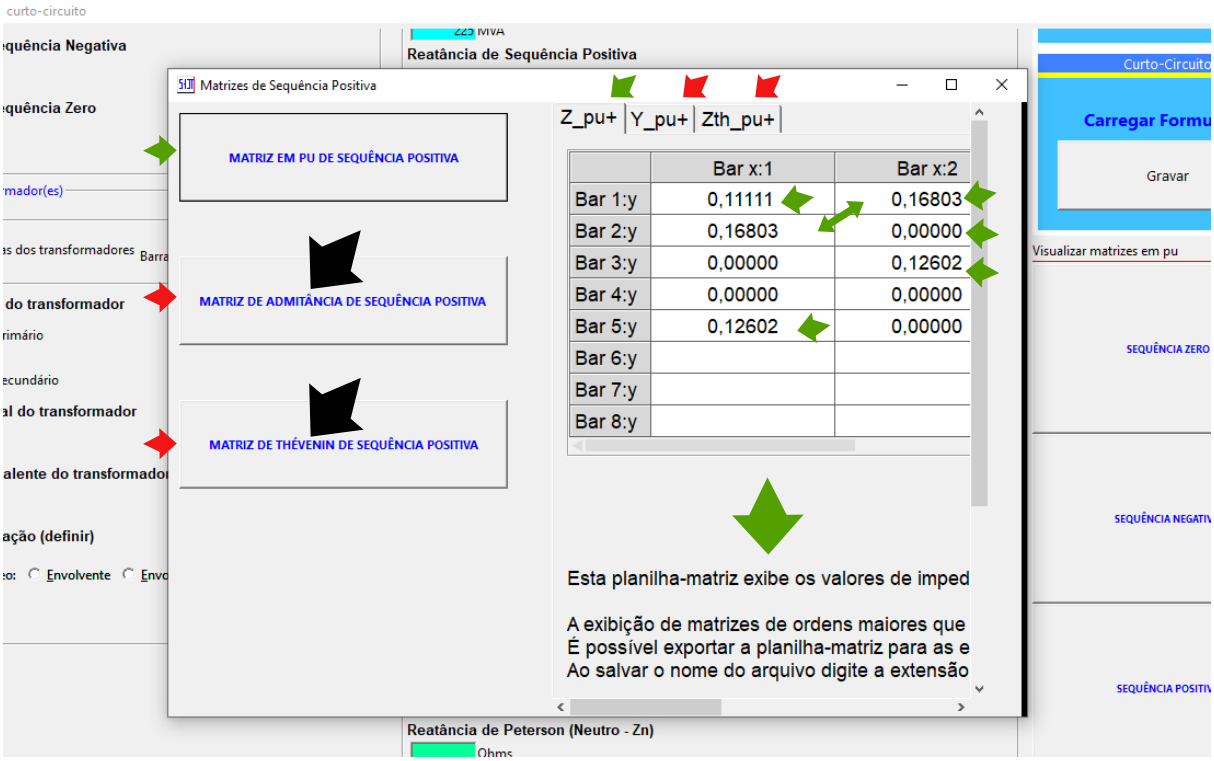
Figura 36 – Saídas no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A



FONTE: autoria própria (2022)

Na Figura 37 é mostrada a interface gráfica de usuário sobreposta ao Formulário. Nota-se que após a primeira vista, pois ainda é necessário maximizar a janela gráfica, é possível verificar que o SHOT-C já fornece o dados de entradas por unidade (p.u.). Para tanto, verifica-se que as células da matriz Y_pu+ já estão de acordo com os dados da última coluna da Tabela 1, ou seja, para a LT 1-2 de fato sua impedância é 0,168 [pu], para a LT 2-3 a impedância é 0,126 [pu] e para a LT 1-5 a impedância é 0,126 [pu]. Por fim, como a tensão nominal do gerador 1 é igual à tensão de base, então resulta em 0,1111 [pu].

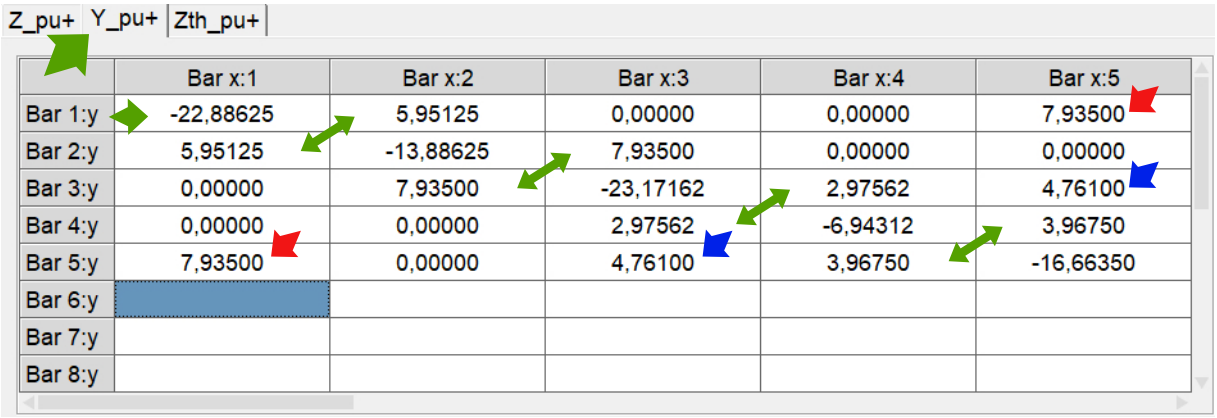
Figura 37 – Janela de Saídas no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A



FONTE: autoria própria (2022)

Na Figura 38 é apresentada a planilha ou a matriz $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$ com todas as células preenchidas, e estando de acordo com a Y-Barra determinada por Carvalho e Kikuchi (2015, p. 61).

Figura 38 – Recorte da saída Y-Barra no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A



FONTE: autoria própria (2022)

A margem de erro calculada pela Equação 5.1, em todos os valores obtidos para os elementos da matriz $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$ foi menor do que 1% comparado à referência de Carvalho e Kikuchi (2015, p. 61). Como exemplo, na Equação 5.2 realizou-se o cálculo de erro sobre a admitância equivalente $\bar{Y}^{+}_{11}$, como sinalizado em verde na célula 11 da Figura 38.

$$Erro(\%) = \frac{|\text{Valor de referência} - \text{Valor analisado}| \times 100}{\text{Valor de referência}} \tag{5.1}$$

$$Erro(\%) = \frac{|(\text{-22,889}) - (\text{-22,88625})| \times 100}{\text{-22,889}} = 0{,}012015\% \tag{5.2}$$

Ademais, ainda na Figura 38 é possível verificar que a matriz é simétrica, estando de acordo com sua definição, os valores simétricos são sinalizados de forma correspondente.

A seguir é mostrada a Figura 39 com a planilha ou matriz de Zth_pu+ equivalente à $\bar{Z}^{+}_{BARRA}$ com todas as células preenchidas, e estando de acordo com a Z-Barra determinada por Carvalho e Kikuchi (2015, p. 61).

Figura 39 – Recorte da saída Z-Barra no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 5A

Z_pu+ | Y_pu+ | Zth_pu+

	Bar x:1	Bar x:2	Bar x:3	Bar x:4	Bar x:5
Bar 1:y	0,07930	0,05580	0,03817	0,05113	0,06084
Bar 2:y	0,05580	0,13386	0,06637	0,06304	0,06055
Bar 3:y	0,03817	0,06637	0,08752	0,07198	0,06032
Bar 4:y	0,05113	0,06304	0,07198	0,23212	0,10018
Bar 5:y	0,06084	0,06055	0,06032	0,10018	0,13007
Bar 6:y					
Bar 7:y					
Bar 8:y					

FONTE: autoria própria (2022)

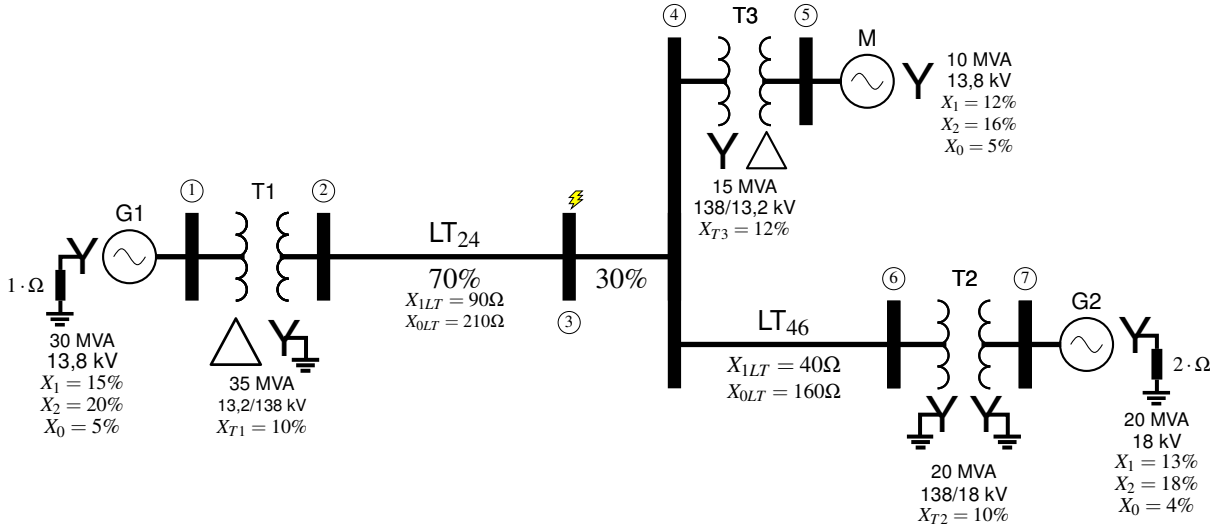
Ainda na Figura 39 é possível verificar que a matriz é simétrica, estando de acordo com a dedução da Equação 3.16, os valores simétricos são sinalizados de forma correspondente. Os valores encontrados comprovam que o Método usado para inversão da Matriz $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$ foi eficiente e adequado.

5.3 Unifilar SYSTEM 7K

O unifilar de 7 barras adaptado, representando um SEP radial é mostrado na Figura 40 com as barras identificadas de 1 a 7, além dos geradores G1 e G2, do motor M, das LTs LT24 e LT46 e, por fim, dos transformadores T1, T2 e T3. Os dados referentes a este sistema são mostrados nas Tabelas 2, 3 e 4, lembrando que as resistências não foram consideradas neste trabalho.

Este sistema possui o motor sem aterramento, conectado à barra 5 por meio de um transformador ⅄-Δ. Desta forma o circuito de sequência zero terá a barra 5 desconectada do restante do sistema, ou seja, a barra 5 estará isolada no circuito de sequência zero.

Figura 40 – SYSTEM 7K



FONTE: adaptado de Kindermann (2018, p. 173)

Tabela 2 – Dados de reatâncias de LT do SYSTEM 7K

Linha para a barra	Percentual %	X1LT Ω	X0LT Ω	X1LT por-unidade	X0LT por unidade
2-4	100	90	210	0,129	0,302
2-3	70	63	147	0,0903	0,2114
3-4	30	27	63	0,0387	0,0906
4-6	100	40	160	0,057	0,23

Fonte: autoria própria (2022)

Tabela 3 – Dados de reatâncias de máquinas síncronas do SYSTEM 7K

Máquina para a barra	3×ZN Ω	X1 %	X2 %	X0 %	3×ZN pu	X1 pu	X2 pu	X0 pu
1-1	3×1	15	12	13	0,471	0,15	0,20	0,05
5-5	0	20	16	18	aberto	0,36	0,48	0,15
7-7	3×2	5	5	4	0,507	0,178	0,247	0,054

Fonte: autoria própria (2022)

Tabela 4 – Dados dos transformadores do SYSTEM 7K

Transformadores para a barra	XT %	XT pu	Tensão Nominal primário (kV)	Tensão Nominal secundário (kV)	Potência Nominal MVA
1-2	10	0,078	13,2	138	35
4-5	12	0,219	138	13,2	15
6-7	10	0,137	138	18	20

Fonte: autoria própria (2022)

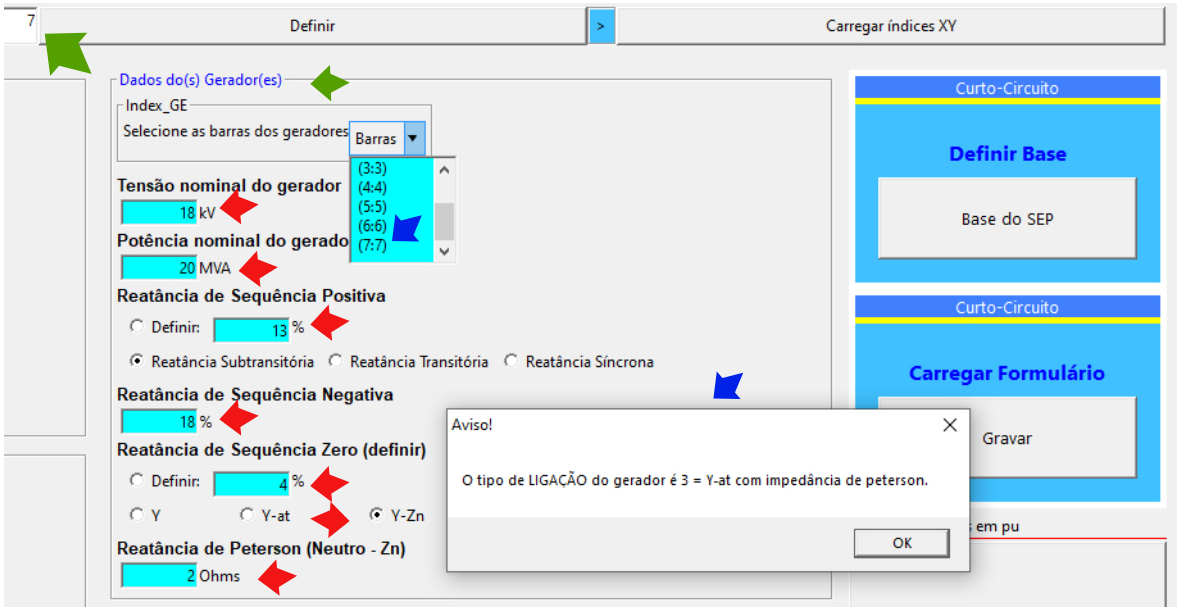
Os dados foram inseridos no Formulário do *software* SHOT-C, considerando uma base igual a $30MVA$ e $13{,}8kV$ na barra 1.

5.3.1 Unifilar SYSTEM 7K - Resultados finais

Na Figura 41 é mostrado o preenchimento do gerador G2 no Formulário do SHOT-C, sinalizado com a seta maior a inserção de 7 barras ao SEP. Dentre as opções do *frame* “Dados do(s) Gerador(es)”, tem-se a opção da impedância de aterramento ou impedância peterson, para tanto, é sinalizado com setas em azul a Figura 41 para orientar que após se clicar na indexação 7:7 é carregado um gerador com ligação 3 com impedância de peterson.

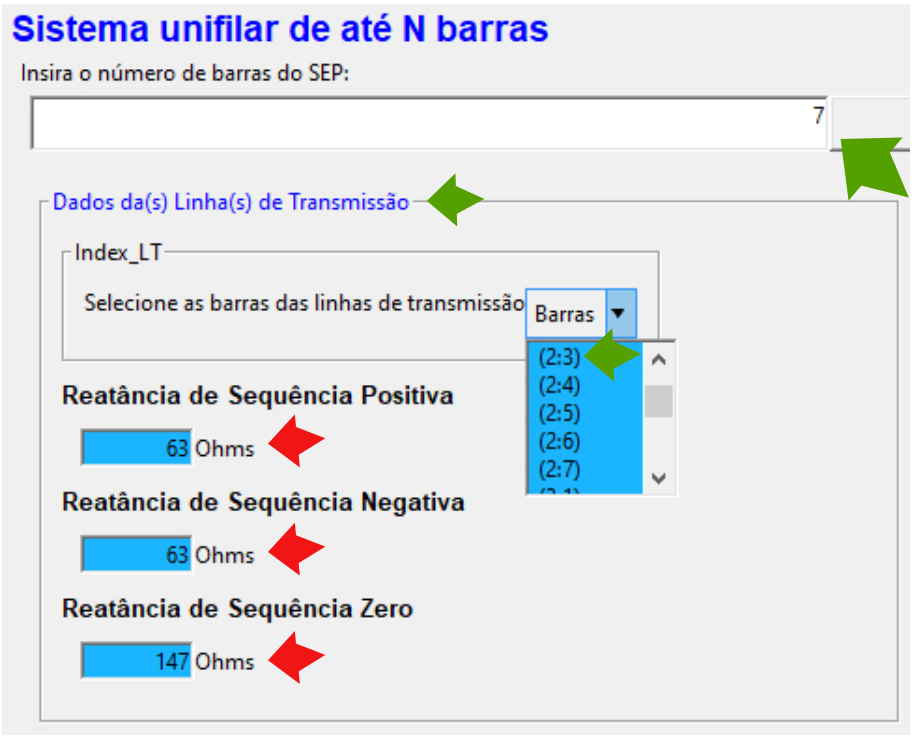
Em relação às entradas das linhas de transmissão, é preciso considerar uma barra adicional, sendo uma adaptação feita sem nenhum prejuízo à interpretação final, pois uma das solicitações para resolução do problema, proposto por Kindermann (2018, p. 173), é o cálculo das impedâncias equivalentes de Thévenin à 70% da LT24, ou seja, na barra 3 (de acordo com a Figura 40). Sendo assim, deve-se realizar o lançamento de não somente 2 linhas, mas de 3 linhas, como mostrado na Tabela 2. A Figura 42 mostra o lançamento da LT24 à 70% com reatâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente, iguais a $j \cdot 63[\Omega]$, $j \cdot 63[\Omega]$ e $j \cdot 147[\Omega]$.

Figura 41 – Recorte da entrada de dados do gerador G2 no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



FONTE: autoria própria (2022)

Figura 42 – Recorte da entrada de dados da LT24 à 70% no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K

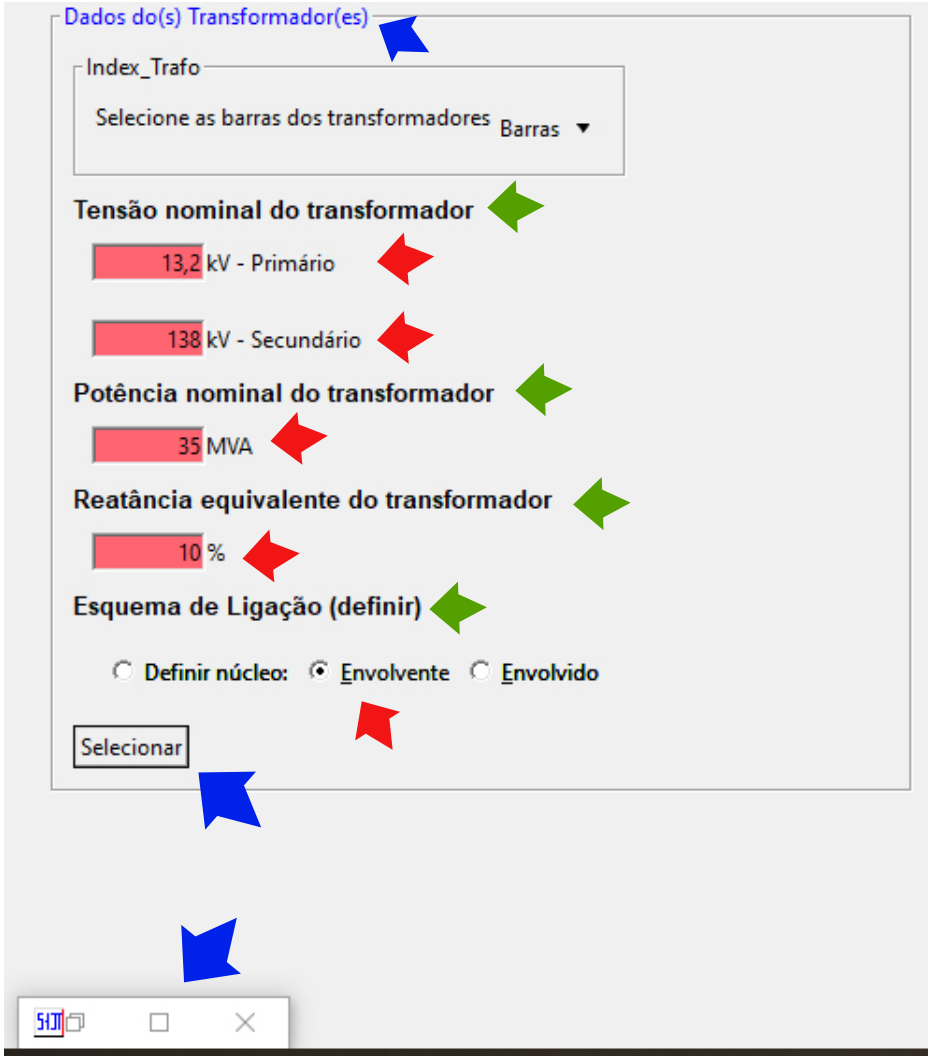


FONTE: autoria própria (2022)

Para as entradas de dados dos transformadores, além do preenchimento dos dados de placa, como sinalizado pelas setas em vermelho na Figura 43, ainda é necessário apertar

o botão “Selecionar” dentro do *frame* “Dados do(s) Transformador(es)”. Após clicar o referido botão, aparece uma interface gráfica de usuário, como mostra a Figura 44, contendo uma lista de possíveis ligações de transformadores. A janela que se abriu foi minimizada, como sinalizado pela seta inferior em azul na Figura 43, e isso acontece com todas as janelas do Formulário (a minimização é amarrada à janela do Formulário). Analisando-se a ligação do transformador T1 na Figura 40 verifica-se que a seleção da ligação deve ser a número 3, como mostrado na Figura 44.

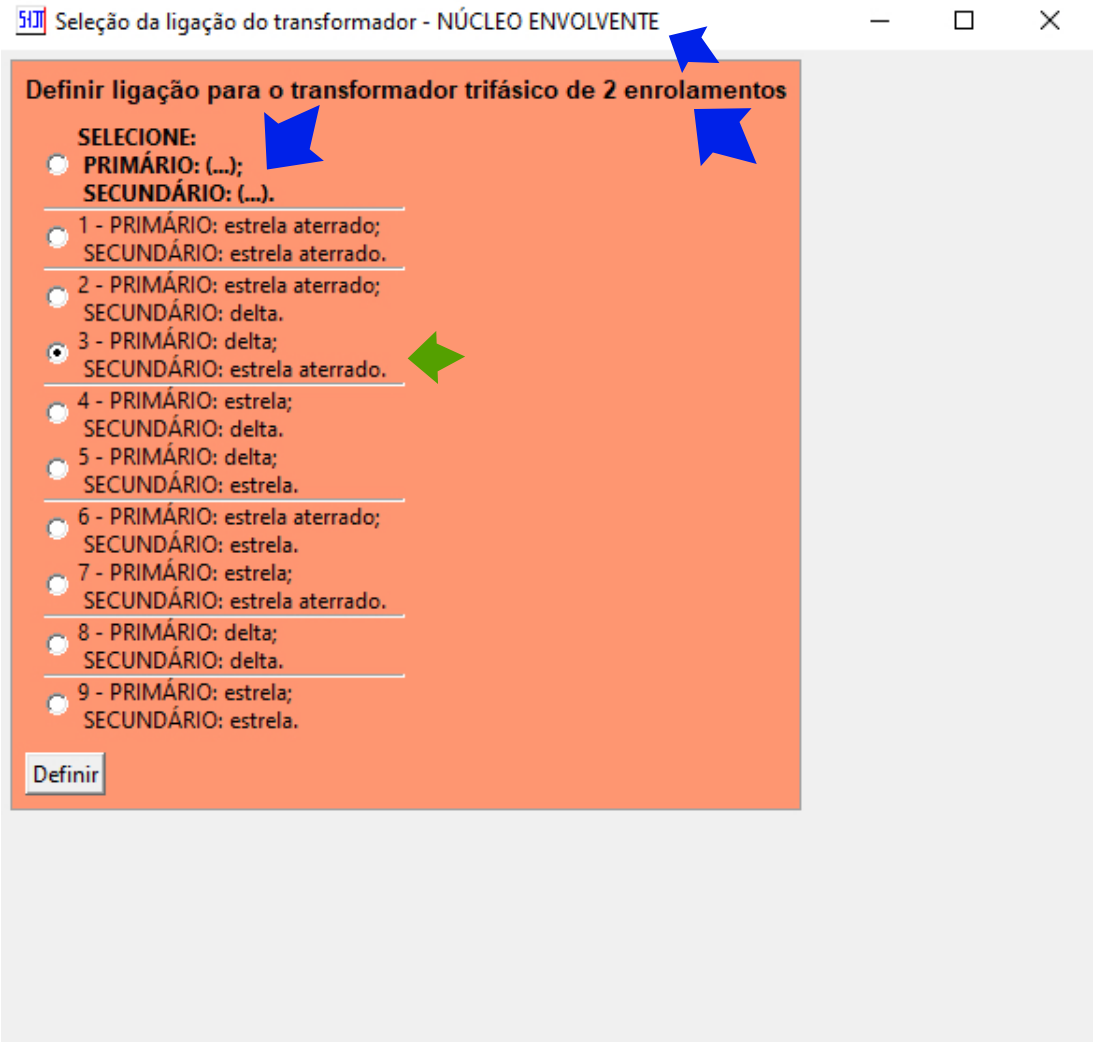
Figura 43 – Recorte da entrada de dados do TR1 no Fórmulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



FONTE: autoria própria (2022)

As indexações dos transformadores são inseridas na lista em index_Trafo, sendo o elemento inicial, dessa lista, um texto orientativo à respeito dos lados primário e secundário. A limitação do *software* SHOT-C permite apenas um transformador entre barras.

Figura 44 – Recorte da interface gráfica de usuário no SHOT-C das possíveis ligações para o TR1 para o SYSTEM 7K

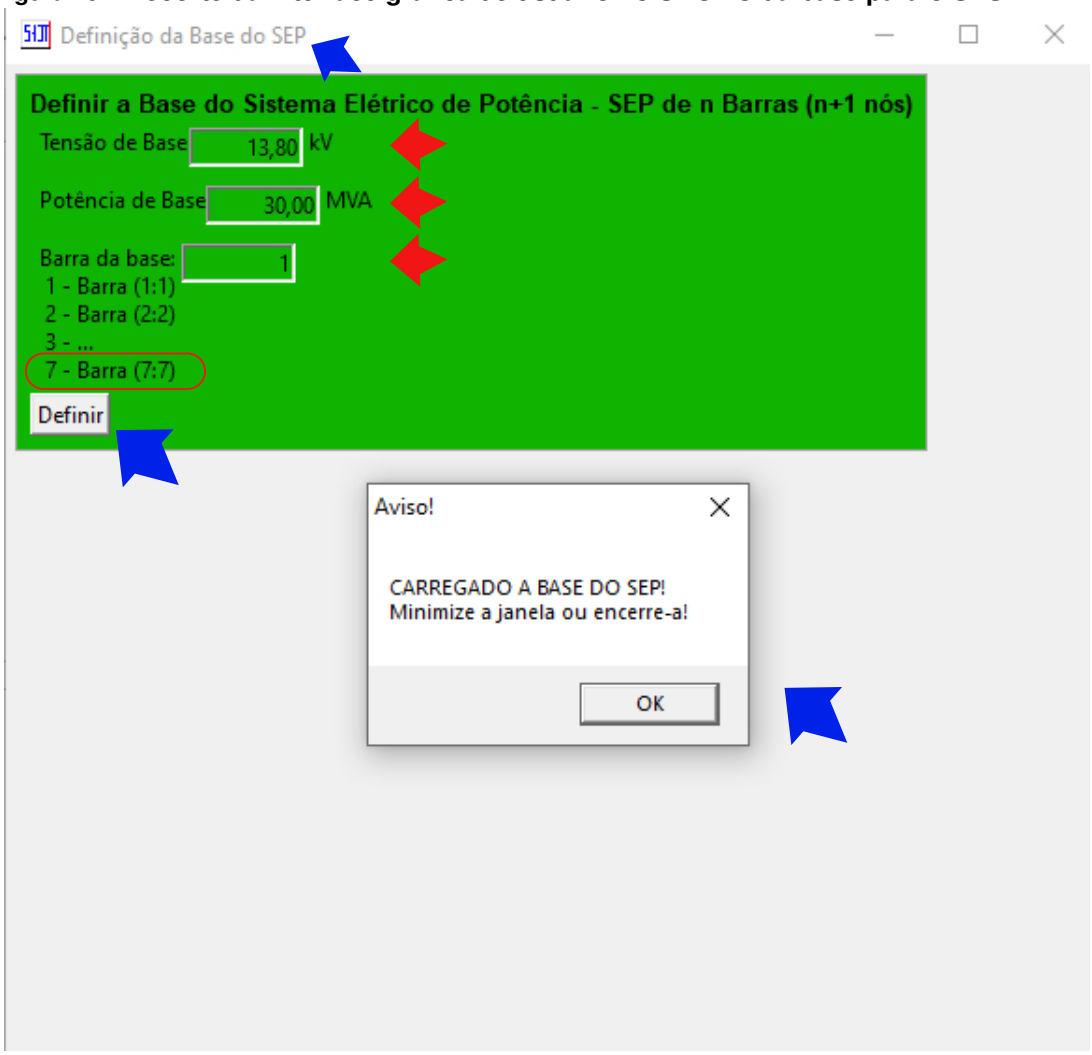


FONTE: autoria própria (2022)

Na Figura 45 é mostrado a entrada de dados relativos às bases adotadas para o SEP. Verifica-se na referida figura, que os valores de base podem ser lançados em qualquer barra, como mostrado na sinalização circular em vermelho. Contudo, Kindermann (2018, p. 31) condicionou a definição da base à esta barra em específico, ou ao lado do gerador G1.

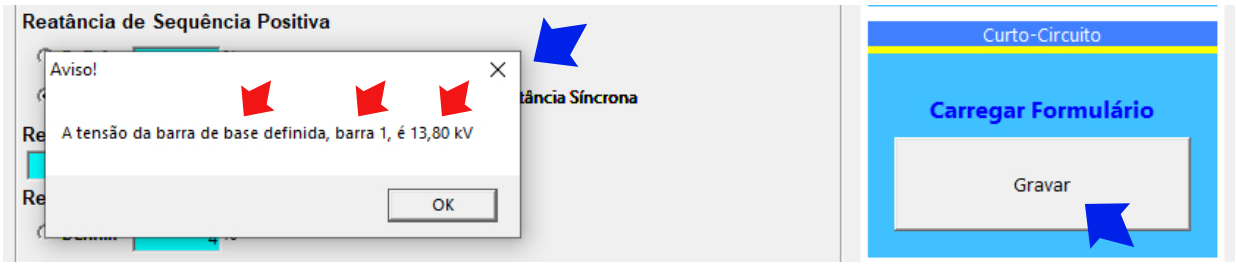
As figuras que se seguem, Figuras 46 a 53, apresentam a sequência de resultados advindos da ação de apertar o botão “Carregar Formulário”, isso após se preencher todos os dados relativos ao SYSTEM 7K no Formulário do SHOT-C. Observando essas figuras é possível realizar a conferência dos cálculos em por-unidade (pu) e do que for pertinente, concluíndo-se assim o lançamento de dados e processamento de de Y-Barra e Z-Barra. Esse processo de cálculo não leva 10 segundos, contudo, é requerido seguir apertando nos botões “OK”, o que pode demorar de acordo com o usuário.

Figura 45 – Recorte da interface gráfica de usuário no SHOT-C da base para o SYSTEM 7K



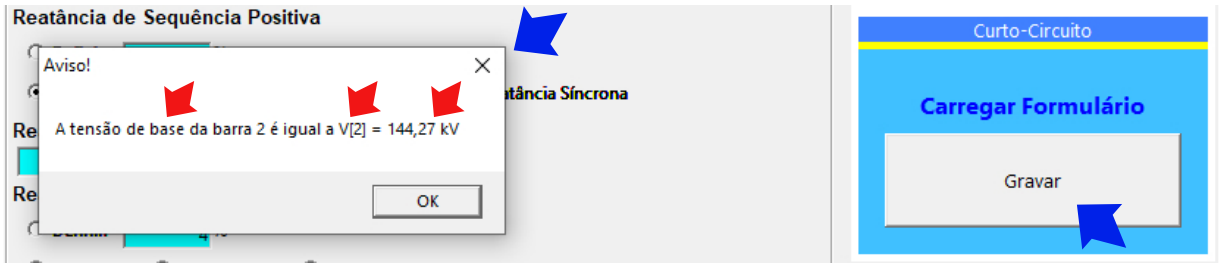
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 46 – Recorte da resultante da base 1 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



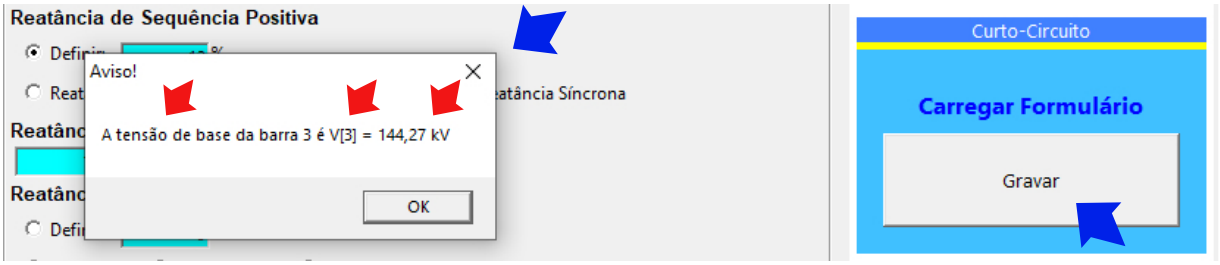
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 47 – Recorte da resultante da base 2 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



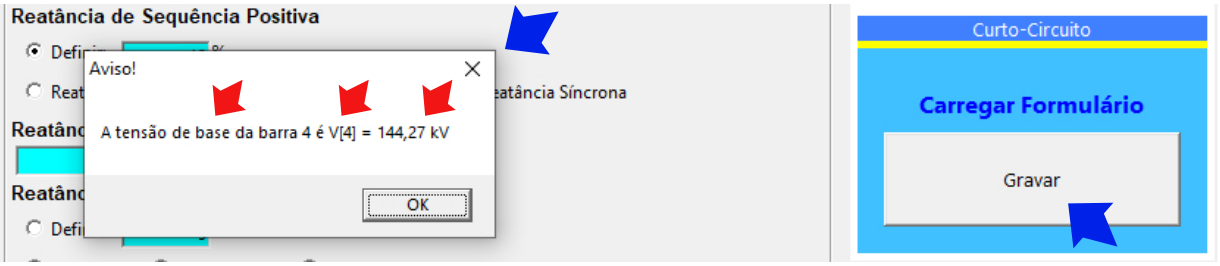
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 48 – Recorte da resultante da base 3 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



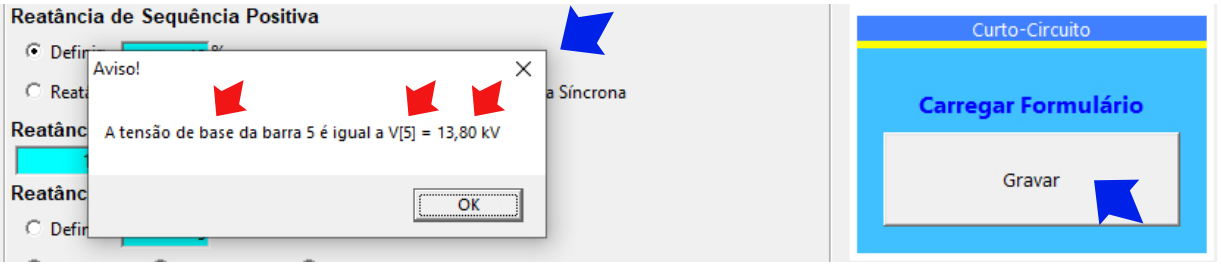
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 49 – Recorte da resultante da base 4 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



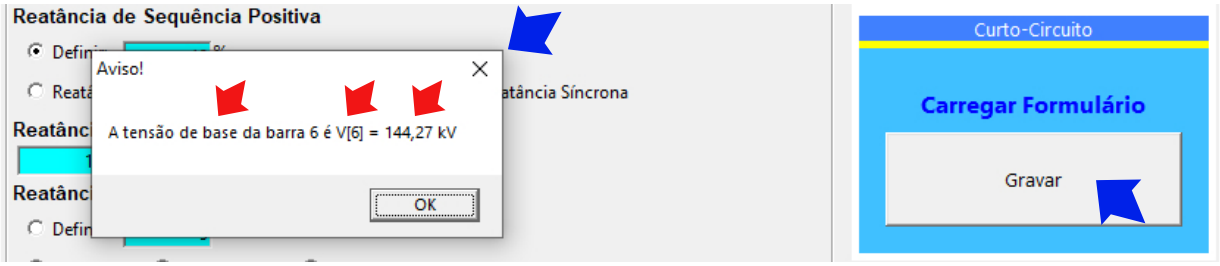
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 50 – Recorte da resultante da base 5 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



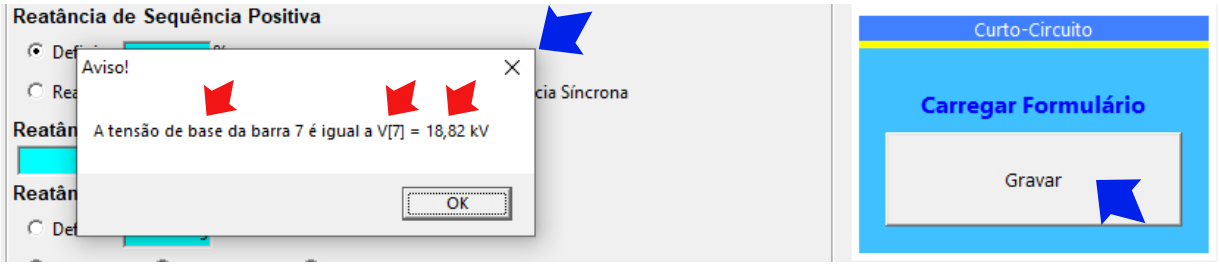
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 51 – Recorte da resultante da base 6 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



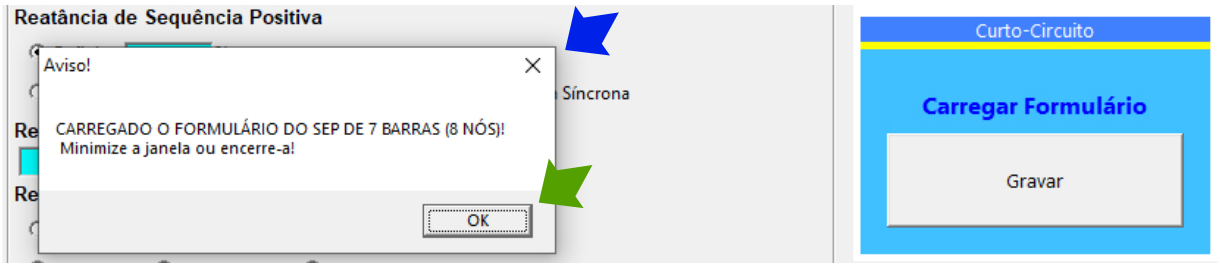
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 52 – Recorte da resultante da base 7 após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



FONTE: autoria própria (2022)

Figura 53 – Recorte do carregamento de Y-Barra e Z-Barra após carregar Formulário do SHOT-C para o SYSTEM 7K



FONTE: autoria própria (2022)

Finalmente, na Seção 5.3.2 são apresentados os resultados de processamento do SYSTEM 7K em planilhas nativas, como, por exemplo, as Figuras 54 e 55, respectivamente, $\bar{Y}^{+}_{BARRA}$ e $\bar{Z}^{+}_{BARRA}$. Além disso, é possível exportar os resultados das planilhas numa extensão .html para se visualizar os dados em um navegador de internet, como mostrado nas Figuras 57 a 59 (as outras opções de exportação são nas extensões LaTeX (.tex) ou texto (.txt)), com isso é possível visualizar toda a matriz Y-Barra e Z-Barra, dado o fato de se tratar de uma matriz 7x7 não sendo possível de se visualizar no SHOT-C sem a barra de rolagem.

5.3.2 Unifilar SYSTEM 7K - Resultados de processamento de Y-Barra e Z-Barra

Como orientado na Figura 36, a visualização de Y-Barra e Z-Barra fica na região inferior direita do Formulário do SHOT-C. Contudo, desta vez é requerido abrir-se as três interfaces gráficas para se coletar os dados das sequências positiva, negativa e zero. Ao apertar nas referidas sequências são obtidos os resultados que se seguem nas Figuras 54 a 59.

Figura 54 – Recorte da planilha de Y-Barra positiva à partir do SHOT-C para o SYSTEM 7K

Z_pu+ | Y_pu+ | Zth_pu+

	Bar x:1	Bar x:2	Bar x:3	Bar x:4	Bar x:5
Bar 1:y	-19,41805	12,75138	0,00000	0,00000	0,00000
Bar 2:y	12,75138	-23,76440	11,01303	0,00000	0,00000
Bar 3:y	0,00000	11,01303	-36,71009	25,69706	0,00000
Bar 4:y	0,00000	0,00000	25,69706	-47,59665	4,55406
Bar 5:y	0,00000	0,00000	0,00000	4,55406	-7,33184
Bar 6:y	0,00000	0,00000	0,00000	17,34552	0,00000
Bar 7:y	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Bar 8:y					

FONTE: autoria própria (2022)

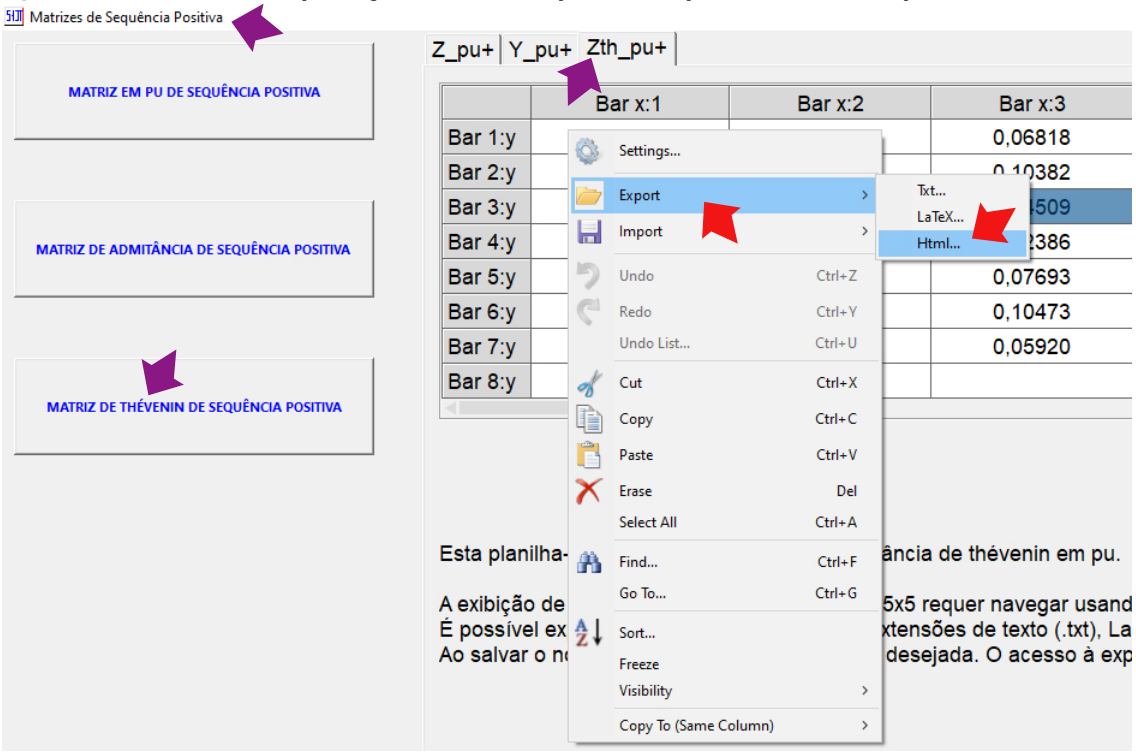
Figura 55 – Recorte da planilha de Z-Barra positiva à partir do SHOT-C para o SYSTEM 7K

Z_pu+ | Y_pu+ | Zth_pu+

	Bar x:1	Bar x:2	Bar x:3	Bar x:4	Bar x:5
Bar 1:y	0,11155	0,09145	0,06818	0,05820	0,03615
Bar 2:y	0,09145	0,13926	0,10382	0,08863	0,05505
Bar 3:y	0,06818	0,10382	0,14509	0,12386	0,07693
Bar 4:y	0,05820	0,08863	0,12386	0,13896	0,08631
Bar 5:y	0,03615	0,05505	0,07693	0,08631	0,19000
Bar 6:y	0,04921	0,07494	0,10473	0,11750	0,07298
Bar 7:y	0,02782	0,04236	0,05920	0,06641	0,04125
Bar 8:y					

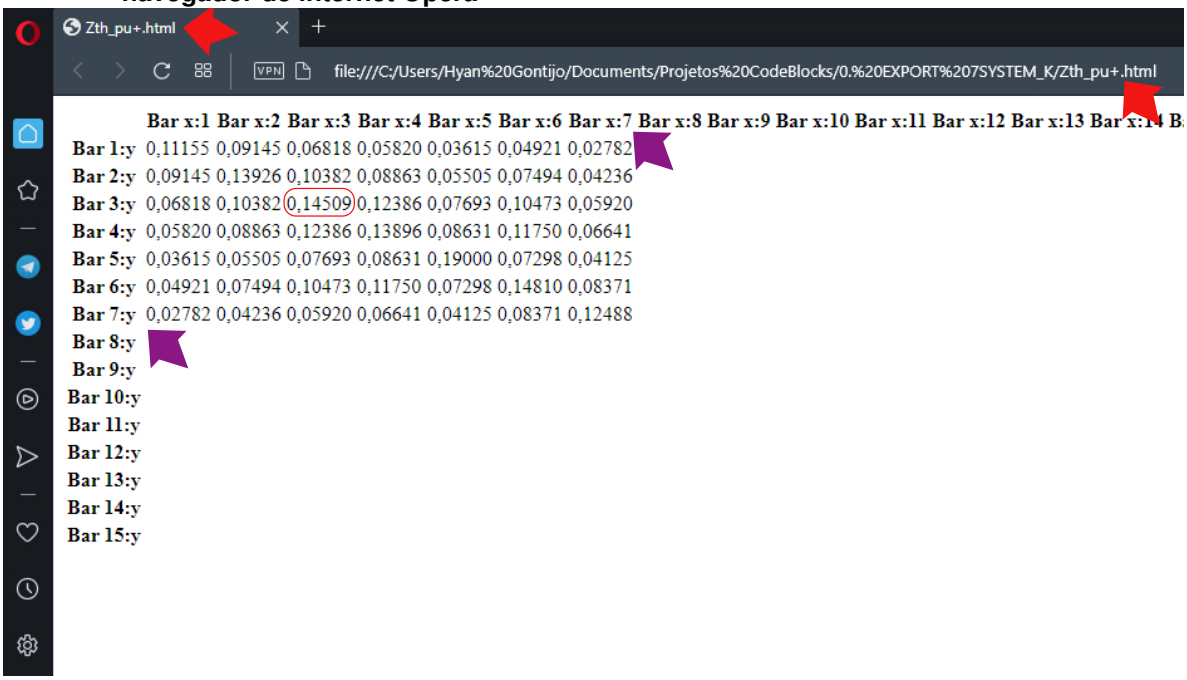
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 56 – Recorte da exportação de Z-Barra positiva à partir do SHOT-C para o SYSTEM 7K



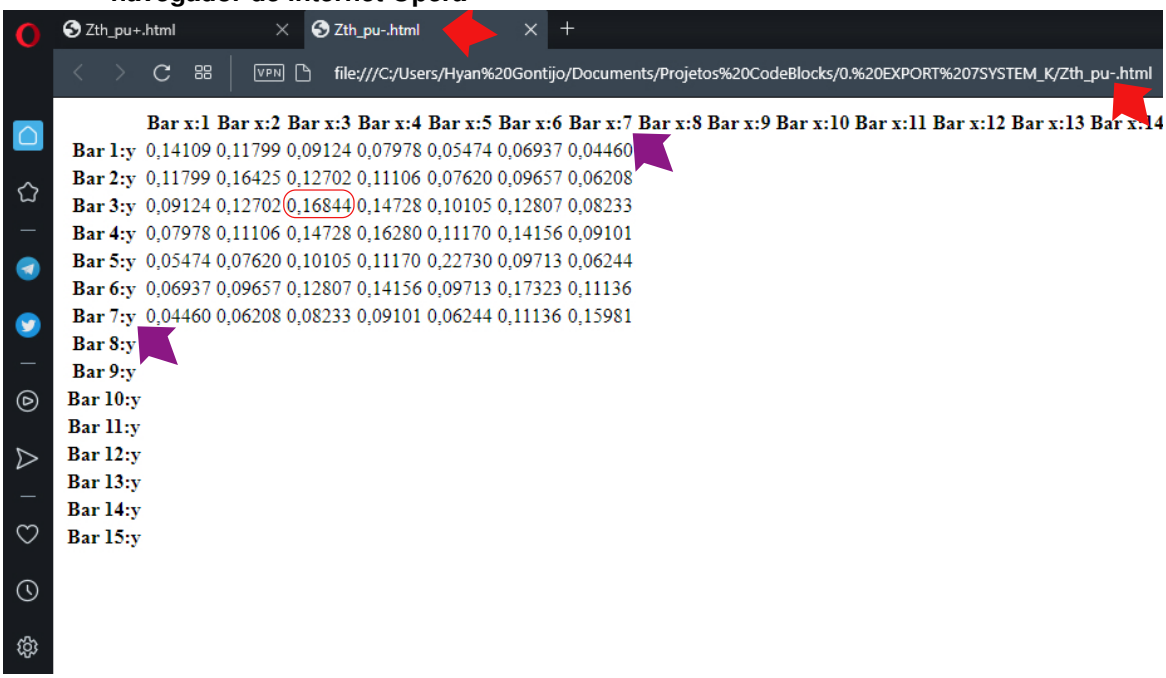
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 57 – Visualização de Z-Barra positiva exportada do SHOT-C para o SYSTEM 7K à partir do navegador de internet Opera



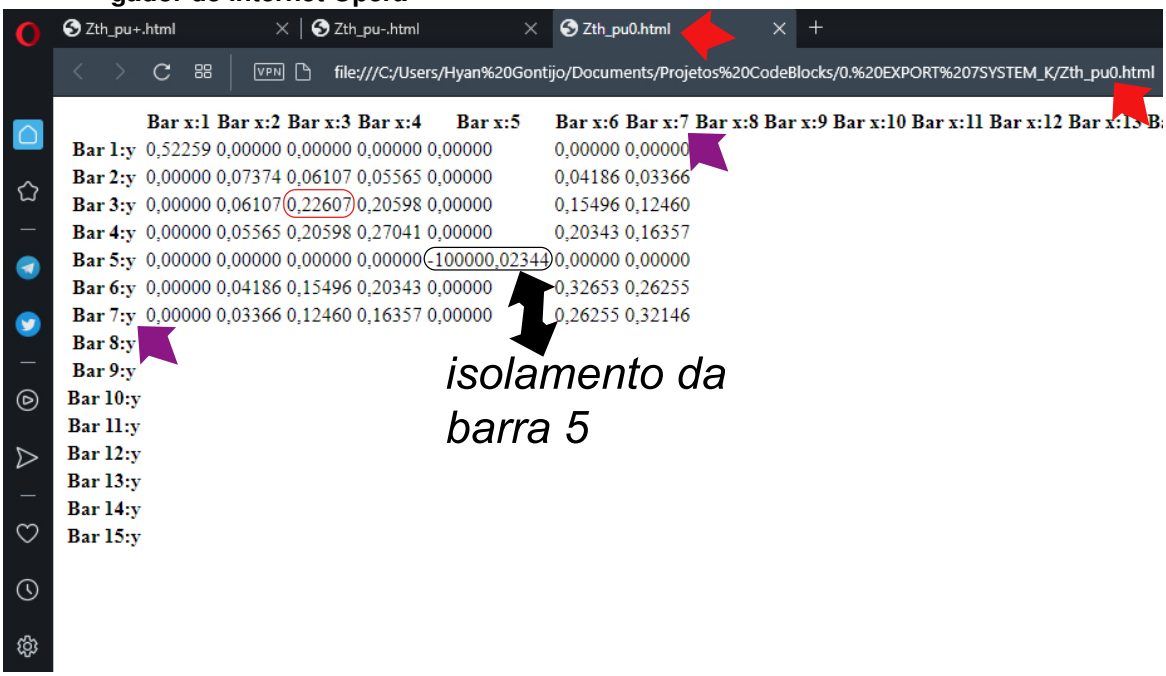
FONTE: autoria própria (2022)

Figura 58 – Visualização de Z-Barra negativa exportada do SHOT-C para o SYSTEM 7K à partir do navegador de internet Opera



FONTE: autoria própria (2022)

Figura 59 – Visualização de Z-Barra zero exportada do SHOT-C para o SYSTEM 7K à partir do navegador de internet Opera



FONTE: autoria própria (2022)

Comparando na Tabela 5 os resultados obtidos das impedâncias equivalentes de Thévenin à 70% da LT24 para as sequências positiva, negativa e zero, respectivamente, advindas

das Figuras 57, 58 e 59, com as impedâncias equivalentes de Thévenin obtidas por Kindermann (2018, p. 180), tem-se um erro percentual menor do que 1%.

Tabela 5 – Resultados comparativos de erro percentual do equivalente de Thévenin à 70$\%$ da LT24 no SYSTEM 7K

Impedância de Thévenin barra 3	**Kindermann (2018)** por-unidade	**Autoria própria (2022)** por-unidade	**Erro** $\%$
Positiva ($\bar{Z}_{33}^{+}$)	0,1447	0,14509	0,26952
Negativa ($\bar{Z}_{33}^{-}$)	0,1680	0,16844	0,26191
Zero ($\bar{Z}_{33}^{0}$)	0,2253	0,22607	0,34177

Fonte: autoria própria (2022)

Importante frisar, ainda em relação à Figura 59, como dito inicialmente na discussão dos resultados do SYSTEM 7K, que a barra 5 é um caso de barra isolada no circuito de sequência zero, e a maneira definida para sinalizar isso na matriz foi realizando-se o cálculo de inversão de Y-Barra para uma admitância igual à 0,00001 [pu], o que por fim resulta numa impedância equivalente de Thévenin aproximadamente igual à 100.000 [pu]. Caso não fosse estabelecido esta definição, não seria possível realizar a inversão da matriz, visto que a diagonal principal não pode conter zeros ou campos vazios.

Em relação aos testes realizados com o SHOT-C, foram identificados outros casos de isolamento/desconexão além do isolamento de barra, como é o caso de ramais desconectados, e esses cenários foram implementados ao SHOT-C dando maior segurança para obtenção da impedância equivalente de Thévenin de sequência zero, e consequentemente para o cálculo de curtos-circuitos assimétricos.

5.3.3 Unifilar SYSTEM 7K - Resultados de processamento das correntes de sequência e correntes reais

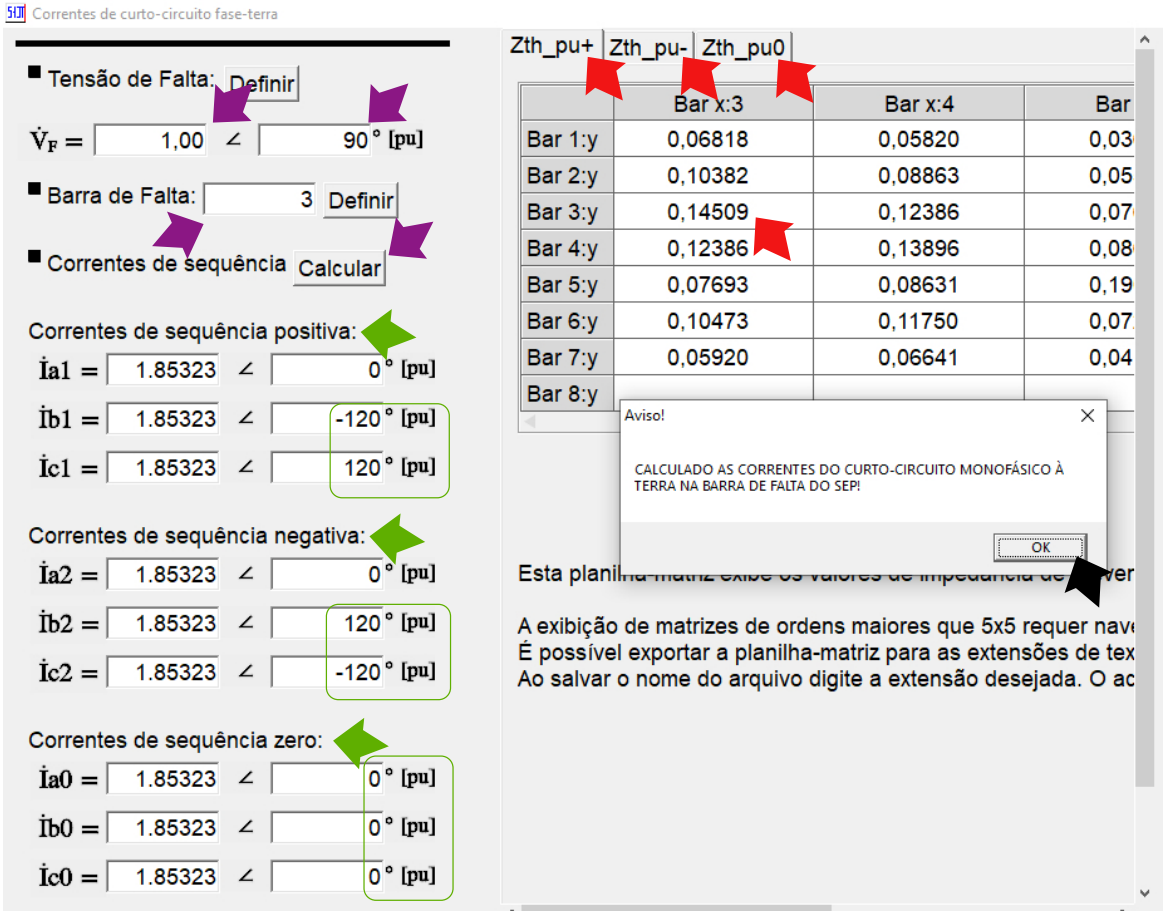
Para encerrar o Capítulo 5 e a validação deste trabalho, a seguir são apresentadas as correntes de falta na barra 3 do SYSTEM 7K para uma falta fase-terra, ou seja, as correntes de curto-circuito monofásico à terra de uma falta à 70$\%$ da LT24. Para se ter acesso ao cálculo dessas correntes, deve-se minimizar ou encerrar a janela gráfica do Formulário do SHOT-C e ir até a janela gráfica principal onde estão localizados os 4 tipos de curto-circuito. Por fim, apertando-se no botão “Calcular” no *frame* em azul do curto-circuito fase-terra, como mostrado na Figura 26, aparece uma interface gráfica de usuário intitulada “Correntes de curto-circuito fase-terra”.

A inserção necessário na referida janela gráfica diz respeito à:

- Tensão de falta $\dot{V}_F$ com módulo e fase;
- Barra de falta, sendo um número inteiro positivo limitado ao número de barras do SEP.

Ao se apertar no botão “Calcular” ao lado do *label* “Correntes de sequência”, à esquerda da referida janela gráfica, surgem alguns avisos antes de se proceder aos cálculos, informando quais capturas de impedâncias estão sendo realizadas. Sendo assim, após apertar em “OK” nos avisos, em seguida, são exibidas as correntes de sequências em valores por-unidade, a corrente de base em Ampère e as correntes das fases abc em Ampère, como mostrado nas Figuras 60 e 61.

Figura 60 – Recorte da interface gráfica de curto-circuito monofásico do SHOT-C para o SYSTEM 7K



FONTE: autoria própria (2022)

A partir da Figura 60 é possível constatar alguns padrões interessantes que confirmam a teoria discutida neste trabalho:

- Nos fasores em cortorno verde das correntes de sequência positiva e negativa, da Figura 60, é possível verificar o primeiro padrão, e diz respeito a diferença entre os ângulos de fase dos fasores b e c das sequências positiva e negativa. Analisando-se as Figuras 6, 7 e 9 é possível confirmar que a sequência negativa é uma adaptação da sequência negativa real, e como consequência tem-se que o operador rotacional $\dot{a}$ não está sendo operado da mesma maneira nas sequências positiva e negativa, como

mostrado nas Equações 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6. Em decorrência disso tem-se a matriz de transformação T como discutido no Capítulo 2.

$$\dot{V}_{b1} = \dot{a}^2 \cdot \dot{V}_{a1} \tag{5.3}$$

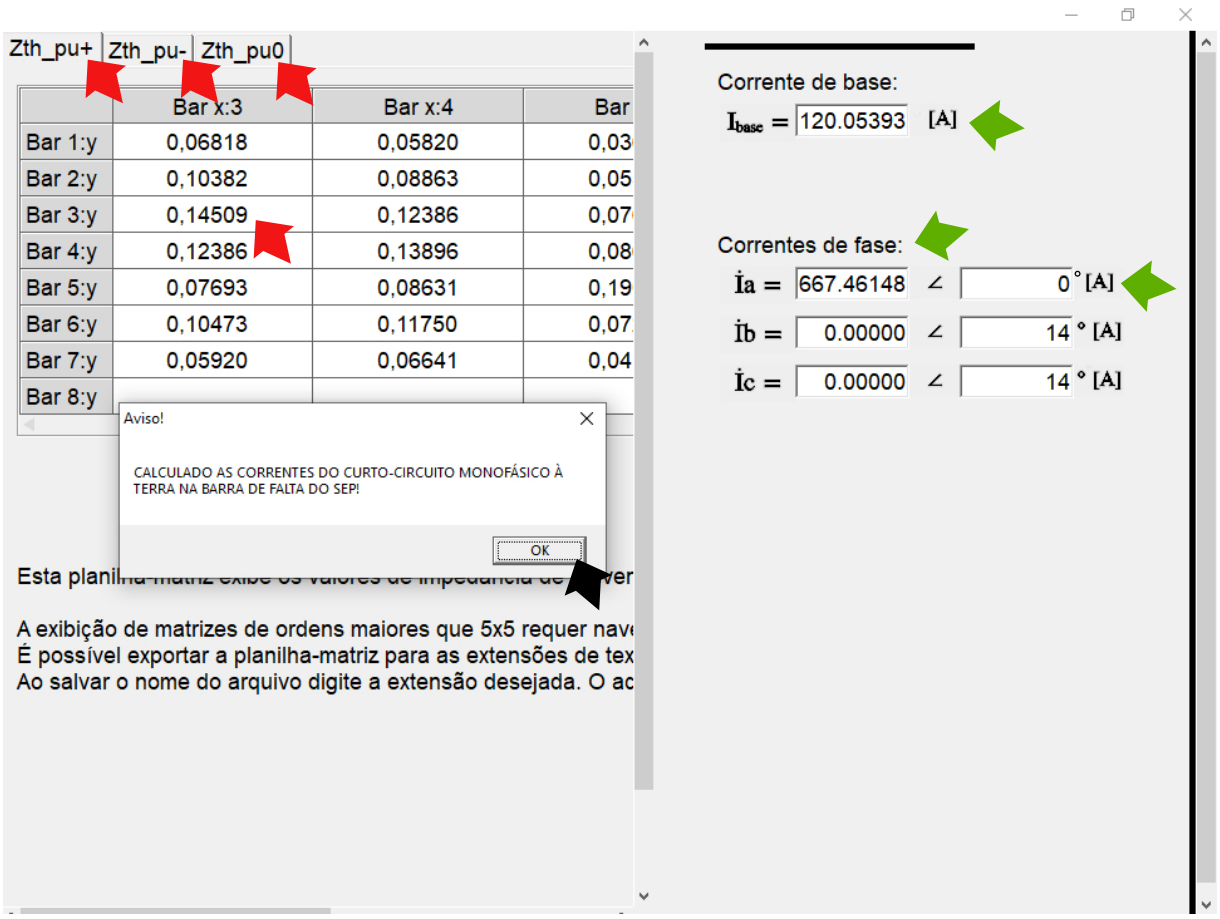
$$\dot{V}_{c1} = \dot{a} \cdot \dot{V}_{a1} \tag{5.4}$$

$$\dot{V}_{b2} = \dot{a} \cdot \dot{V}_{a2} \tag{5.5}$$

$$\dot{V}_{c2} = \dot{a}^2 \cdot \dot{V}_{a2} \tag{5.6}$$

- As fases das correntes de sequência zero são todas nulas, estando assim de acordo com o diagrama fasorial de sequência zero, como mostrado na Figura 8.

Figura 61 – Recorte 2 da interface gráfica de curto-circuito monofásico do SHOT-C para o SYSTEM 7K



FONTE: autoria própria (2022)

O comparativo e a margem de erro dos resultados obtidos nas Figuras 60 e 61 frente aos resultados calculados por Kindermann (2018, p. 181) para um curto-circuito fase-terra à 70% da LT24 são mostrados na Tabela 6. A margem de erro obtida para os valores comparados é menor do que 1%.

Tabela 6 – Resultados comparativos de erro percentual das correntes para uma falta monofásica à 70% da LT24 do SYSTEM 7K

Correntes na barra 3	**Kindermann (2018)** por-unidade	**Autoria própria (2022)** por-unidade	**Erro** %
Positiva (I^a_{33-1})	1,8587	1,85323	0,29429
Negativa (I^a_{33-2})	1,8587	1,85323	0,29429
Zero (I^a_{33-0})	1,8587	1,85323	0,29429
Correntes reais	[A]	[A]	%
Base (I_{base})	120,05	120,05393	$3{,}27{\cdot}10^{-3}$
Fase a (I_a)	669,41	667,46148	0,29108
Fase b (I_b)	0	0	0
Fase c (I_c)	0	0	0

Fonte: autoria própria (2022)

5.4 Conclusão do capítulo

Neste capítulo discutiu-se 2 sistemas particulares do sistema elétrico do potência: o primeiro consistiu de um SEP em anel com duas malhas e; o segundo consistiu de um SEP radial com transformadores, LTs e máquinas síncronas. No segundo sistema foi possível analisar situações adversas de ilhamento de barra. Os resultados foram apresentados por alguns *prints-creens* das interfaces gráficas de usuário do SHOT-C e em tabelas comparativas de resultados obtidos.

Sendo assim, a validação do SHOT-C foi feita utilizando exemplos extraídos de referências bibliográficas revisadas e conhecidas, comparando-se os resultados, mostrou-se que a margem de erro entre os resultados das referências e dos obtidos pelo SHOT-C é menor do que 1%. Ou seja, considerando-se uma margem de erro tão pequena frente ao tempo de processamento de cálculo menor do que 10 segundos, foi possível reconhecer a eficácia e precisão do *software* desenvolvido para os sistemas simulados. Para o objetivo deste trabalho, ao qual se destina para o uso acadêmico, o *software* se mostra adequado.

6 CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um *software* proprietário para cálculo de curtos-circuitos simétricos e assimétricos no sistema elétrico de potência. Para fundamentação de cálculo, realizou-se uma revisão teórica sobre a modelagem de curto-circuito dos elementos do SEP sob a presença de um curto-circuito. Nessa modelagem ignorou-se a parte real das impedâncias complexas, além dos elementos *shunt* das linhas de transmissão. Ademais, procedeu-se ao estabelecimento de condições iniciais, ao longo do trabalho, para generalização das modelagens sob a ótica das componentes simétricas, assim, sendo possível obtenção dos Rakes de Impedâncias de Thévenin (RITs) para os curtos-circuitos fase-terra, bifásico, bifásico-terra e trifásico, além da generalização do cálculo das correntes de curto-circuito.

Diferentemente das referências discutidas, este trabalho propõe-se a evidenciar as matrizes Y-Barra e Z-Barra das sequências positiva, negativa e zero, respectivamente, as matrizes $\bar{Y}^{+}_{Barra}$, $\bar{Y}^{-}_{Barra}$, $\bar{Y}^{0}_{Barra}$, $\bar{Z}^{+}_{Barra}$, $\bar{Z}^{-}_{Barra}$ e $\bar{Z}^{0}_{Barra}$. Após isso, procedeu-se à apresentação de como realizar a inversão da matriz Y-Barra para obtenção da matriz Z-Barra através de 3 métodos, de forma computacional, utilizando-se, porém, somente o método 1 (Regra de Laplace com a matriz adjunta). A inversão se mostrou adequada para um tempo menor que 10 segundos para matrizes simuladas de ordem até 7x7, e menor que 30 segundos para matrizes simuladas de ordem até 10x10.

Com respeito à metodologia adotada no desenvolvimento do *software* SHOT-C empregou-se a metodologia enxuta, denominada *LEAN*, por conter um “guarda-chuva” de filosofia de desenvolvimento simples, porém com compromisso à autenticidade do objetivo, mesmo que isso resulte em uma demanda maior de tempo para se compreender os requisitos levantados, e os advindos, mais a fundo, buscando-se com isso garantir o aprendizado, a capacitação e estabelecer uma entrega de tecnologia que de fato atenda às necessidades reais.

O *software* SHOT-C se mostrou uma ferramenta interessante, possuindo diversas interfaces gráficas de usuário redimensionáveis, botões, campos coloridos, entradas intuitivas e planilhas nativas, além de robustez pela capacidade de gerar listas de indexação de barras. Os resultados dos cálculos se mostraram precisos e passíveis de serem armazenados em texto (.txt), LaTeX (.tex) e HTML (.html). Ademais, os valores gerados como saída podem ser facilmente copiados em seus campos de textos ou planilhas. Por fim, o SHOT-C ainda possui uma enorme vantagem de ser ajustado por linha de código e recompilado, não requisitando-se de uma pendência de outra tecnologia para sua expansão.

Por fim, com relação às simulações realizadas para validação do SHOT-C utilizou-se um sistema em anel denominado SYSTEM 5A com 5 barras e 2 malhas, contendo somente linhas de transmissão e geradores. Foi utilizado também um segundo sistema, radial, denominado SYSTEM 7K com 7 barras e ilhamento da barra 5 devido a presença do motor síncrono de ligação estrela não aterrado presente nessa barra. Neste sistema, havia a presença de linhas de transmissão, transformadores de 2 enrolamentos de núcleo envolvente para três tipos diferentes

de ligação, além de geradores e motor síncronos. Com apenas esses dois sistemas foi possível reunir uma ampla gama de requisitos que deveriam ser satisfeitos para validação do *software* SHOT-C, tanto do ponto de vista de entrada de dados, de cálculos, da capacidade de converter todas as bases do SEP, como do ponto de vista de saída de dados consistentes tanto no sentido de apresentação via planilhas nativas e planilhas exportadas como no sentido resultados confiáveis.

Dessa maneira, tendo os resultados demonstrado equivalência com as referências bibliográficas, com uma margem de erro menor do que 1%, e uma ferramenta computacional consistente na exibição gráfica de interfaces, botões e campos, foi possível validar o *software* SHOT-C para os objetivos específicos e geral deste trabalho, sendo uma aplicação computacional adequada para o uso acadêmico, visto que o mesmo poderá ser modificado, ajustado e trabalhado para casos, em particular, não abordados neste trabalho ou em virtude de algo que não foi ponderado com devido rigor de codificação.

6.1 Disponibilidade do SHOT-C em servidor

O *software* SHOT-C está disponível em um servidor drive da Google em parceria com a UTFPR, o Google Drive. Em virtude do alto volume de linhas do código-fonte, 17 mil linhas de código (considerando-se também os espaços em branco e comentários), foi disponibilizado no Localizador Uniforme de Recursos, do inglês *Uniform Resource Locator* (URL) abaixo:

1) o instalador do executável (.exe) do SHOT-C;

2) o código-fonte para compilação, caso o usuário deseje obter um executável limpo ou com modificações pertinentes;

3) o código XML gerado pelo compilador Code:Blocks informando a estruturação do projeto criado via linguagem C, requerendo-se obter as bibliotecas e montá-las no IDE (*Integrated Development Environment*) de sua preferência;

4) a licença de uso acadêmico.

A URL do servidor: **encurtador.com.br/guCF5**

Qualquer mudança de servidor ou disponibilização, dos referidos itens, deverá ser consultado junto ao e-mail repositorio-ct@utfpr.edu.br.

6.2 Projetos futuros

Partindo-se deste TCC, projetos futuros podem ser criados visando a capacitação de profissionais do setor elétrico de potência, bem como meio de uma ferramenta didática de alto nível no meio acadêmico. As sugestões do autor são as que se seguem:

- Desenvolver uma funcionalidade de entrada de dados utilizando leitura de arquivos de texto, LaTeX ou HTML. A ideia consiste em fazer o SHOT-C detectar um arquivo nessas extensões automaticamente, realizar a captura de dados para as variáveis de cálculo, tais como tensão nominal, potência nominal, impedância complexa completa e esquema de ligação para transformadores, sejam estes de dois ou três enrolamentos, bem como para transformadores com ajuste de TAP;
- Desenvolver uma funcionalidade para cálculo de impedâncias do SEP por meio do cálculo de fluxo de potência, dessa maneira o SHOT-C poderia realizar o estudo de curtos-circuitos em conjunto com análise de cargas com potência reativa e ativa;
- Desenvolver uma funcionalidade para cálculo de curtos-circuitos com a presença de Transformador de Aterramento (TAT);
- Desenvolver uma funcionalidade para estudo de curtos-circuitos em linhas de transmissão longas e linhas de transmissão não longas considerando a resistência das linhas e transformadores;
- Otimizar a inversão de Y-Barra através de técnicas como a técnica de esparsidade, expandido o uso do SHOT-C para sistemas elétricos de potência com mais de 10 barras;
- Por fim, desenvolver uma funcionalidade para cálculo de curtos-circuitos no sistema de distribuição radial multiaterrado com a presença de geração fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York, USA: McGraw-Hill, 1999. 1307 p. (IEEE Press power engineering series). ISBN 0-7803-3427-2.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). **Contratos de Concessão e Permissão de Distribuição**. [*S.l.*], 2015. Arquivo xls hospedado. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/contratos-de-distribuicao. Acesso em: 08 ago. 2020.

BICHELS, A. **Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução**. Curitiba-PR: EDUTFPR, 2018. 466 p. ISBN 978-85-7014-206-1.

CARVALHO, N. R. J. d.; KIKUCHI, B. C. **Desenvolvimento de um algoritmo para cálculo de curto-circuito simétrico em sistemas elétricos de potência**. 2015. 131 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Engenharia Industrial Elétrica/Eletroténica, Departamento Acadêmico de Eletroténica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/10092. Acesso em: 20 abr. 2022.

CASTRO, C. A. **ET720 - Sistemas de Energia Elétrica I**: Capítulo 3 - gerador síncrono. [*S.l.*], 2015. Notas de Aulas – turma ET720 da Unicamp DSE/FEEC.

COPEL Distribuição S.A. - Superintendência de Engenharia de Distribuição (SED). **Manual de Apresentação de Projetos de Proteção para Acessantes de Geração**. [*S.l.*], 2021. 111 p. Disponível em: https://www.copel.com/hpcweb/wp-content/uploads/2021/01/GUIA-PROJETOS-PROTECAO-GERACAO-DISTRIBUiDA-R1.pdf. Acesso em: 18 abr. 2021.

FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 37, n. 6, p. 629–716, 1918.

GAERTNER, D. L. M.; GONÇALVES, G. F. **Aplicação de religadores monofásicos em redes de distribuição**. 2015. 94 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/350.pdf. Acesso em: 25 set. 2019.

GHINATO, P. Sistema toyota de produção: Mais do que simplesmente just-in-time. **Revista Produção - ABEPRO**, v. 5, n. 2, p. 169–189, 1995. Disponível em: https://www.leanway.com.br/wp-content/uploads/Paper-05-Estrutura-STP.pdf. Acesso em: 20 abr. 2022.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. **Power System Analysis and Design**. 2. ed. Boston, USA: PWS Publishing Company, 1994. 583 p. ISBN 0-53493-960-0.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. J. **Power System Analysis and Design**. 5. ed. Stamford, USA: Cengage Learning, 2011. 848 p. ISBN 978-1-111-42577-7.

IEZZI, G.; HAZZAN, S. **Fundamentos de matemática elementar, 4**: sequências, matrizes, determinantes e sistemas. 8. ed. São Paulo: Atual, 2013. 292 p. ISBN 978-85-357-1748-8.

KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 4. ed. Florianópolis - SC: Edição do Autor, 2007. 233 p. ISBN 85-900853-3-3.

KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 6. ed. Florianópolis - SC: Edição do Autor, 2018. 249 p. ISBN 978-85-900853-9-3.

LIKER, J. K.; CONVIS, G. L. **O modelo Toyota de liderança Lean**: como conquistar e manter a excelência pelo desenvolvimento de lideranças. Porto Alegre : Bookman: Bookman, 2013. 289 p. ISBN 978-85-8260-017-7.

OLIVEIRA, T. L. **Desenvolvimento de uma plataforma computacional gráfica e de código aberto para estudos de sistemas de potência**. 2016. 177 f. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14614. Acesso em: 27 ago. 2019.

PINTO, P. P. **Uma abordagem para a condução de Retrospectivas Scrum baseada nos conceitos de melhoria contínua e *Lean Software Development*** . 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado) — Pós graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em: https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/1675/1/arquivo6809_1.pdf. Acesso em: 20 abr. 2022.

POPPENDIECK, T.; POPPENDIECK, M. **Lean Software Development**: An agile toolkit for software development managers. 1. ed. Boston, USA: Addison-Wesley, 2003. ISBN 978-0-321-15078-3.

PRESS, W. *et al.* **Numerical Recipes in C**: The art of scientific computing. 2. ed. New York, USA: Cambridge University Press, 1992. 1018 p. ISBN 0-521-43108-5.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. d. R. **Cálculo Numérico**: Aspectos teóricos e computacionais. 2. ed. Rio de Janeiro: Pearson - Makron Books, 1997. 424 p. ISBN 978-85-346-0204-4.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 447 p. ISBN 978-85-352-6886-7.

SAYÃO, M.; LEITE, J. C. S. d. P. Rastreabilidade de requisitos. **RITA**, v. 12, n. 1, p. 57–86, 2005. Disponível em: http://www-di.inf.puc-rio.br/~julio/rastreabilidade5.pdf. Acesso em: 27 ago. 2019.

SCRUTON, R. **Modern Philosophy: An Introduction and Survey**. [*S.l.*]: Penguin Books, 1996. 624 p. ISBN 978-0140249071.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise sistemas de potência**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil (Rio de Janeiro), 1978. 347 p. Traduzido por Ademaro A. M. B. Cotrim e Revisado por Antônio N. Meneguzzi.

STEVENSON, W. D. **Elementos de análise de potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 708 p. Traduzido por Arlindo Rodrigues Mayer, João Paulo Muinussi e Somchai Ansuj.

TECGRAF/PUC-RIO. **IUP**: Portable user interface - version 3.30. [*S.l.*], 2020. Disponível em: https://www.tecgraf.puc-rio.br/iup/. Acesso em: 13 ago. 2020.

The Khronos Group. **FAQ**. 2022. Página Web. Disponível em: https://www.khronos.org/opengl/wiki/FAQ. Acesso em: 20 abr. 2022.

The Khronus Group. **Khronos Members**. 2022. Página Web. Disponível em: https://www.khronos.org/members/list. Acesso em: 20 abr. 2022.

TRINDADE, G. O.; LUCENA, M. Requirements traceability in agile methodologies: A exploratory survey. *In*: **Proceedings of the XII Brazilian Symposium on Information Systems on Brazilian Symposium on Information Systems: Information Systems in the Cloud Computing Era - Volume 1**. Porto Alegre, BRA: Brazilian Computer Society, 2016. (SBSI 2016), p. 478–485. ISBN 9788576693178.

TURINE, M. A. S.; MASIERO, P. C. **Especificação de requisitos: uma introdução**. [*S.l.*], 1996. 26 p. Disponível em: http://www2.unemat.br/rhycardo/download/engenharia_de_requisitos.pdf.

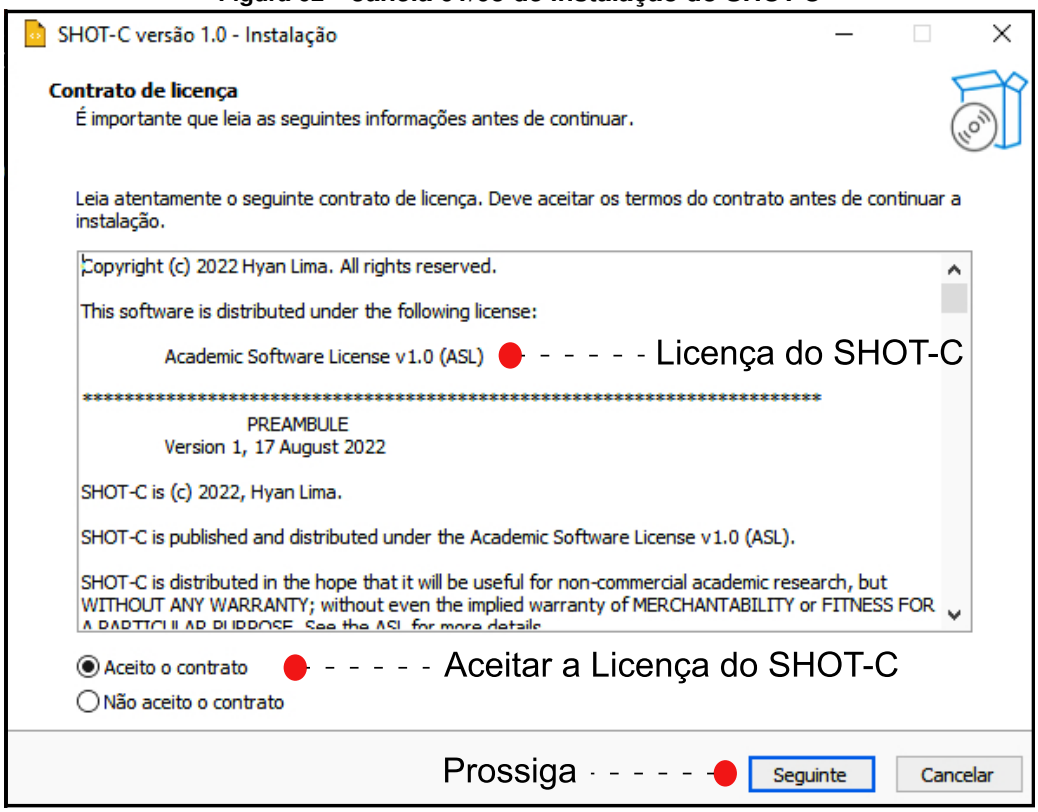
UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2014. 708 p. Traduzido por AMGH Editora Ltda. – Porto Alegre. ISBN 0-0733-8046-6.

APÊNDICE A – Manual do Usuário do *Software* SHOT-C

A.1 Instalação do *software* SHOT-C

Este manual tem como referência o sistema operacional Windows 10 versão 21H2 profissional. Ao baixar o SHOT-C da internet, ou construir o executável da forma que convier, procede-se à instalação do *software* através do arquivo executável “Instalador SHOT-C.exe”. Clicando-se, duas vezes, no referido executável surge a interface de usuário como mostrada na Figura 62. Ao longo deste manual adotou-se uma sinalização baseada em marcadores circulares vermelhos, com uma linha de cota e uma texto em maior escala, para chamar atenção dos elementos das janelas, bem como orientar para ações que precisam ser realizadas.

Figura 62 – Janela 01/05 de instalação do SHOT-C



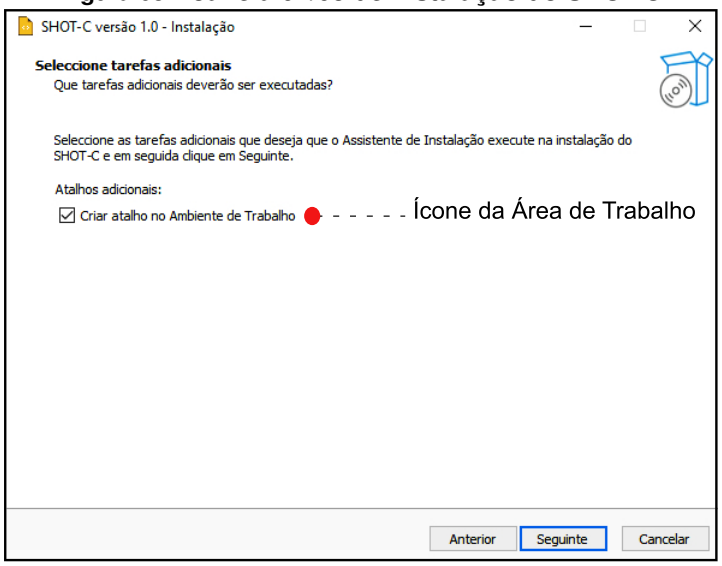
FONTE: autoria própria (2022)

Clique em “Aceito o contrato” e prossiga para a próxima janela de instalação do SHOT-C, para tanto, clique no botão “Seguinte”. Se surgir um aviso do Windows 10 sobre “Fornecedor: desconhecido”, ao realizar o duplo clique no executável, ignore e clique em “Sim”, para permitir a instalação. Em um cenário incomum de instalação, pode ser requerido a instalação no modo administrador, para tanto, clique com botão direito do mouse sobre o executável e clique em “Executar como administrador”. Se ainda assim, não for possível usar o instalador, é possível criar um instalador através de um criador de instalador, e, inclusive, é possível gerar um executável do SHOT-C via o IDE do Code::Blocks, assim dispensando-se o instalador do executável. Com relação a construção do código-fonte do SHOT-C, em “.c”, com as bibliotecas da

TECGRAF, no IDE do Code::Blocks, leia com atenção o código XML disponível no servidor do SHOT-C.

A Figura 63 mostra a segunda janela de instalação, onde recomenda-se selecionar (ticar) a caixa “Criar atalho no Ambiente de Trabalho”, ou seja, um ícone será criado na área de trabalho do sistema operacional (Desktop do Windows 10).

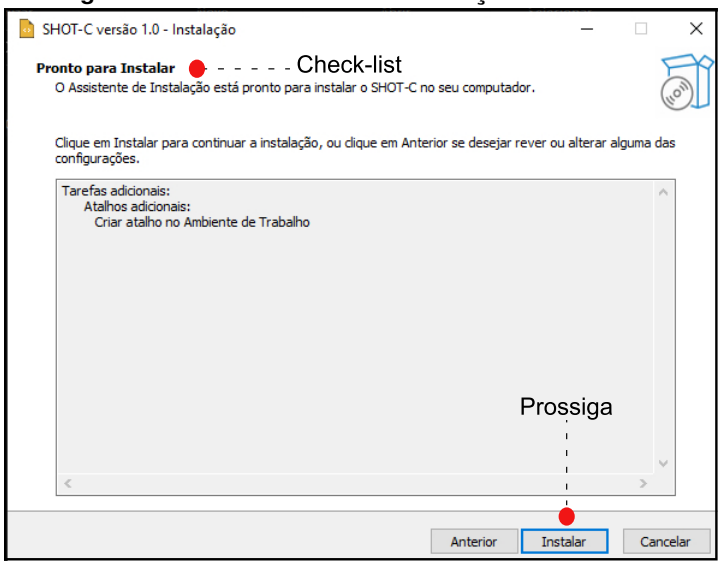
Figura 63 – Janela 02/05 de instalação do SHOT-C



FONTE: autoria própria (2022)

A Figura 64 mostra a terceira janela de instalação, onde é informado o que será instalado no sistema operacional.

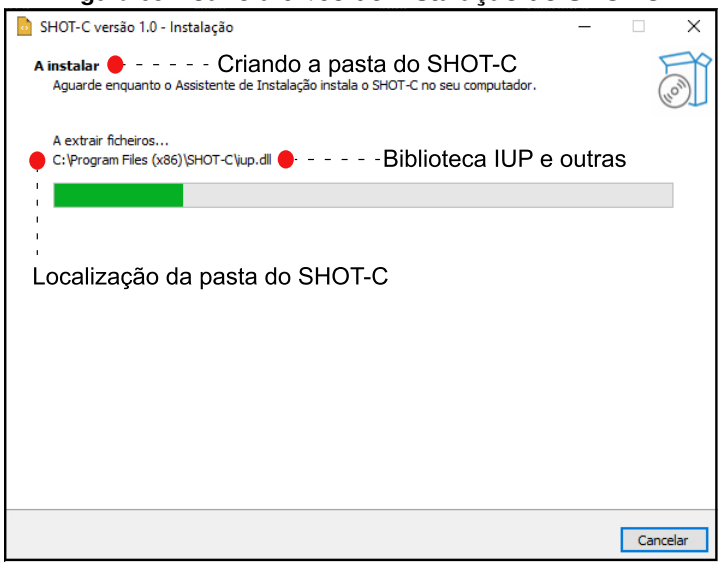
Figura 64 – Janela 03/05 de instalação do SHOT-C



FONTE: autoria própria (2022)

A Figura 65 mostra a quarta janela de instalação, onde é processado a instalação do SHOT-C, criando-se uma pasta à qual o executável terá acesso as bibliotecas da TECGRAF, ou seja, o executável precisa “enxergar” as dlls (bibliotecas .dll), caso contrário o SHOT-C não funcionará.

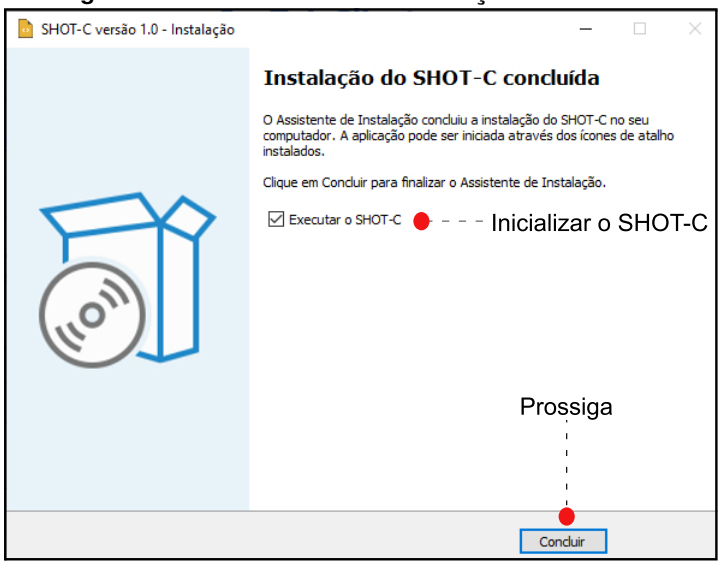
Figura 65 – Janela 04/05 de instalação do SHOT-C



FONTE: autoria própria (2022)

A Figura 66 mostra a quinta, e última, janela de instalação, após clicar em “Concluir” é inicializado o SHOT-C.

Figura 66 – Janela 05/05 de instalação do SHOT-C



FONTE: autoria própria (2022)

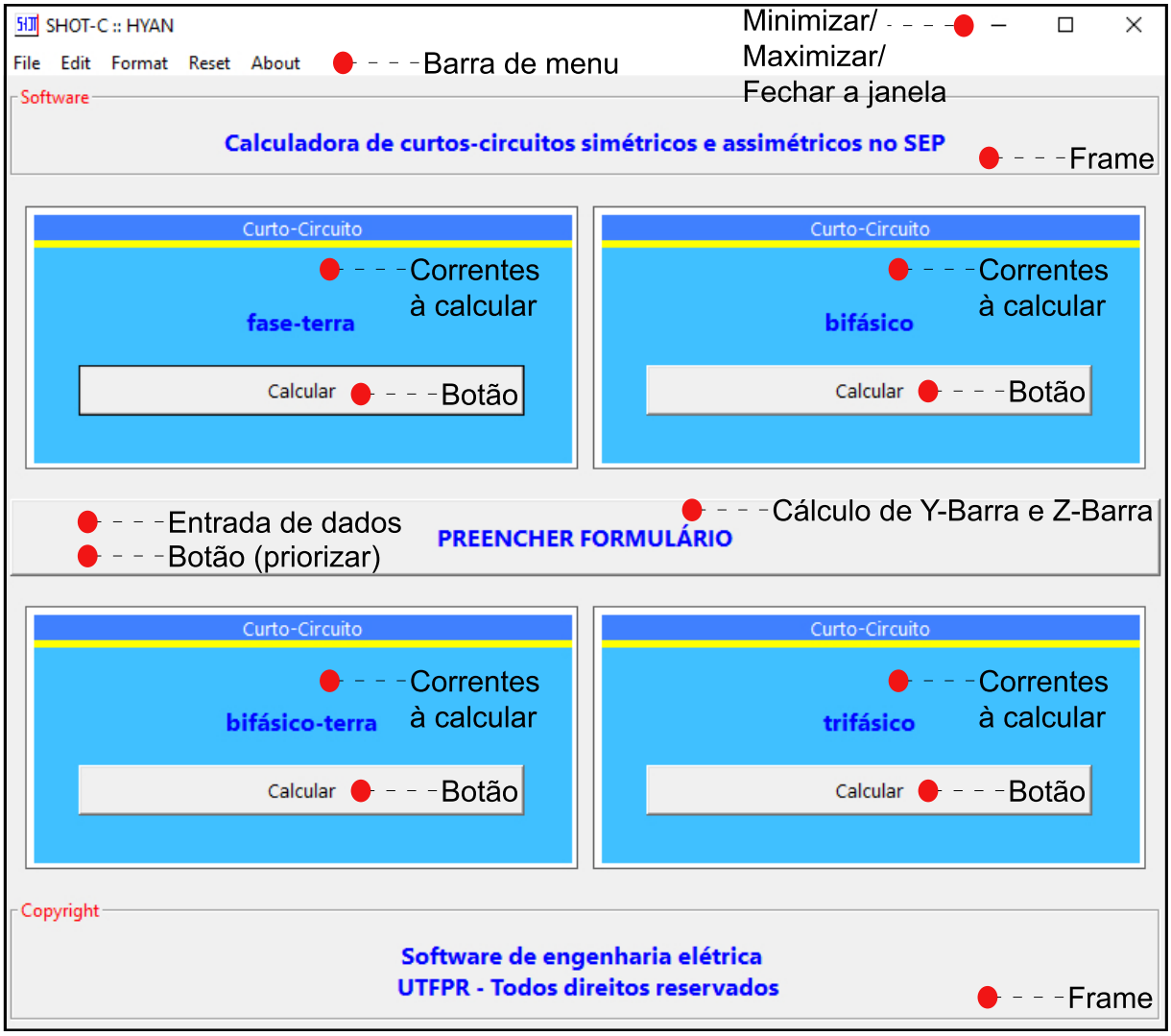
Todas as cinco janelas de instalação são criadas automaticamente pelo programa de computador chamado “Inno Setup” (um criador de instalador), este criado por Jordan Russell

em 1997. O referido programa serve para instalar outros programas de computadores dentro do sistema operacional, ou seja, utilizou-se o Inno Setup para instalar o SHOT-C dentro do sistema operacional Windows 10.

A.2 Uso do *software* SHOT-C

A Figura 67 mostra a primeira interface gráfica de usuário do SHOT-C, ou seja, a janela inicial ou principal do SHOT-C. Na referida figura é sinalizado com marcadores circulares vermelhos, com uma linha de cota e uma texto em maior escala, para chamar atenção dos elementos das janelas. Importante enfatizar que o SHOT-C possui o núcleo central no seu Formulário, sendo este gerado pelo botão central da janela inicial, e este botão, por sua vez, o primeiro que precisa ser clicado para entrada de dados dos elementos modelados para curto-circuito.

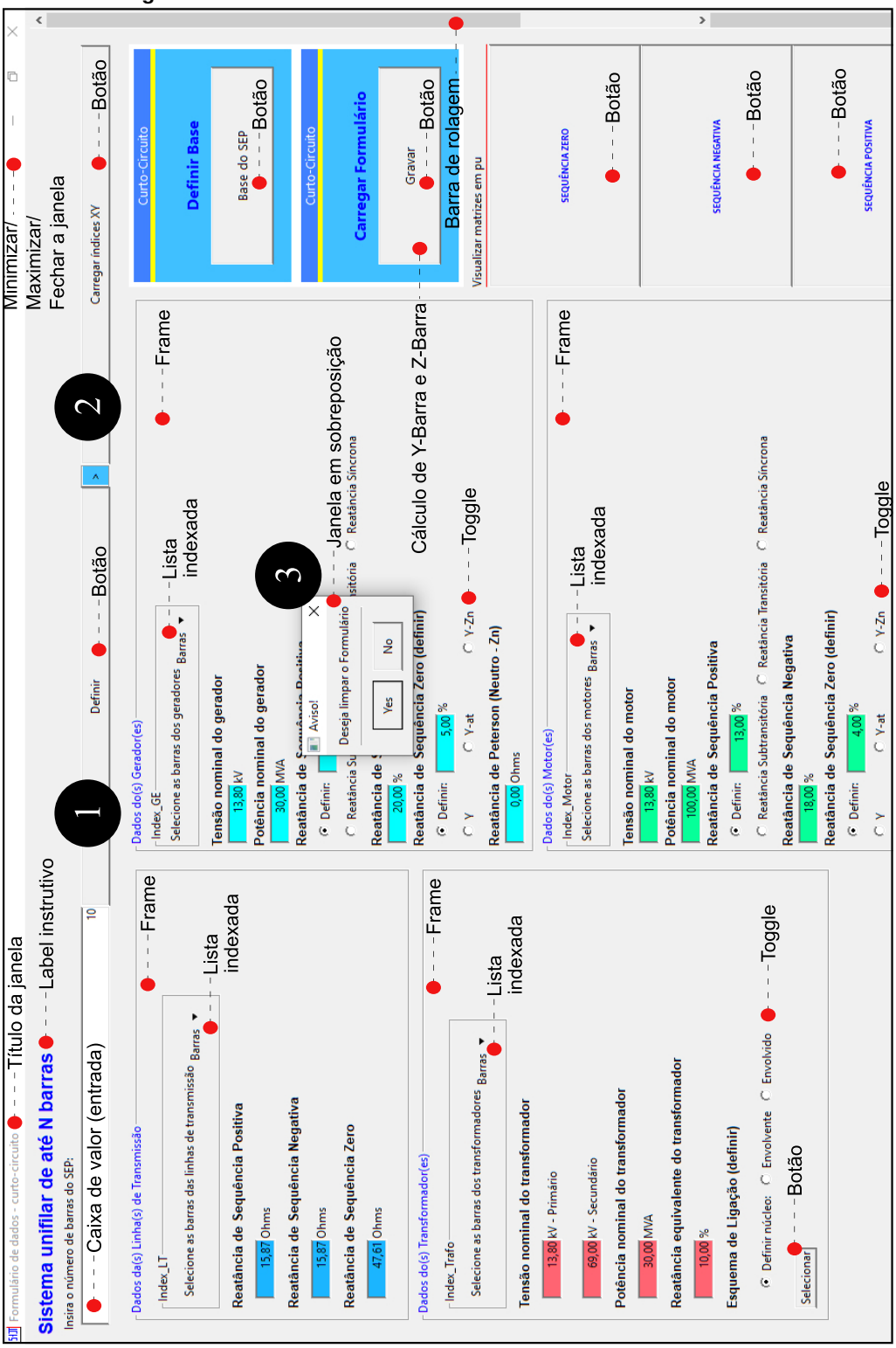
Figura 67 – Janela inicial do SHOT-C – Detalhamento



FONTE: autoria própria (2022)

A Figura 68 mostra a segunda interface gráfica de usuário do SHOT-C, ou seja, o Formulário do SHOT-C. Nessa figura, além dos marcadores circulares vermelhos, também, está sendo sinalizado com três numeradores circulares, em preto e em grande escala, os três passos iniciais para uso do Formulário do SHOT-C.

Figura 68 – Janela do Formulário do SHOT-C – Detalhamento



FONTE: autoria própria (2022)

A seguir é mostrada a Figura 69, esta mostra, novamente, a segunda interface gráfica de usuário do SHOT-C, ou seja, a janela do Formulário, com o passo a passo de como preencher o Formulário e calcular Y-Barra e Z-Barra. Como dito anteriormente, é no Formulário onde inseri-se os valores reais dos elementos modelados para curto-circuito, sendo esses elementos as linhas de transmissão não longas, os geradores síncronos, os transformadores de 2 enrolamentos e os motores síncronos.

O referido passo a passo é mostrado por setas coloridas com texto em escala maior, bastando seguir a numeração em ordem crescente. Dentre as referidas setas, àquelas com a mesma numeração indicam a possibilidade de escolha dos elementos do SEP que se deseja inserir os valores reais. Mesmo que, se, os campos do Formulário do SHOT-C estejam preenchidos e, se, não for clicado na indexação da lista, do *frame*, nada acontecerá no processamento de cálculo. Enfatizando-se, assim, que o SHOT-C não coleta os dados do Formulário ao se clicar em “Carregar Formulário”, este processa os valores reais armazenados em uma memória, e estes valores, por sua vez, são coletados do Formulário através do clique sobre o índice da lista indexada para o elemento do SEP desejado. Os 7 passos que orientam o uso do Formulário do SHOT-C são:

Passo 1: ao preencher a caixa de valor, ao lado com botão “Definir”, com o número de barras do SEP (anel ou radial), procede-se ao clique do botão “Definir”;

Passo 2: para disparar a indexação das listas nos *frames*, do Formulário, deve-se clicar no botão “Carregar índices XY”;

Passo 3: o SHOT-C pergunta se deseja limpar o Formulário, os valores prévios são soment e de exemplo, podendo ser reutilizados, com exceção dos *toggles*;

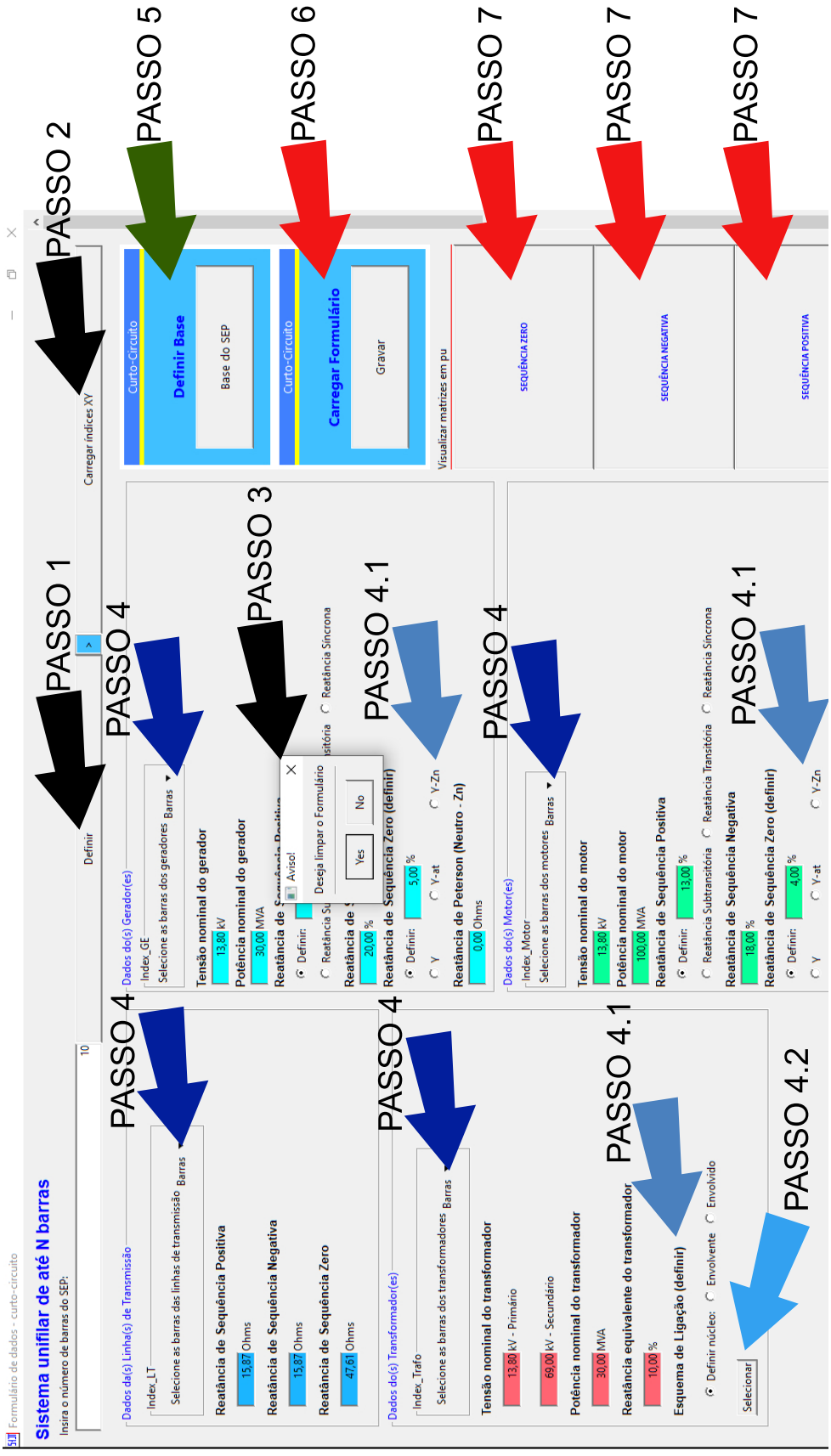
Passo 4: ao clicar na setinha voltada para baixo é exibido uma lista indexada, inserindo-se os valores reais do elemento do SEP, procede-se ao clique do índice referente à barra (X:X) em que o elemento está conectado, ou ao índice entre barras (X:Y ou Y:X) do elemento existente entre barras, todos demais índices não clicados serão processados pelo SHOT-C como elementos de SEP inexistentes;

Passo 5: o botão “Base do SEP” serve para definir uma barra do lado em que se encontra a tensão e a potência de base, podendo ser qualquais valores;

Passo 6: o botão “Carregar Formulário” serve para processar o cálculo de todas as bases, a conversão para pu dos elementos do SEP, cálculo de Y-Barra e Z-Barra, deve-se ignorar a mensagem de erro das sequências que não tiveram valores inseridos;

Passo 7: ao se clicar nos botões “Sequência Zero”, “Sequência Negativa” e “Sequência Positiva”, são exibidas as planilhas de Zpu, Ypu e Zth_pu, respectivamente, as planilhas das matrizes em pu: de impedâncias dos elementos de SEP modelados para curto-circuito, de admitâncias (Y-Barra) e de Thévenin (Z-Barra).

Figura 69 – Janela do Formulário do SHOT-C – 7 passos



FONTE: autoria própria (2022)

A.3 Exemplos práticos - Roteiro em 7 passos

Para esclarescer o uso do SHOT-C, a seguir, são dados alguns exemplos práticos, embora estes tenham diferentes características, é sempre possível seguir os 7 passos:

Exemplo EX1: para inserir uma linha de transmissão entre as barras 7:8 de um SEP em anel com 9 barras, onde se deseja calcular somente as sequências positiva e negativa, procede-se aos seguintes passos:

Passo 1-EX1: preenche-se a caixa de valor com o número 9 e procede-se ao clique do botão "Definir";

Passo 2-EX1: procede-se ao clique do botão "Carregar índices XY";

Passo 3-EX1: o SHOT-C pergunta se deseja limpar o Formulário, os valores prévios são somente de exemplo, podendo ser reutilizados, com exceção dos *toggles*;

Passo 4-EX1: primeiro deve-se inserir as impedâncias complexas sem o j imaginário e sem a parte real, sendo permitido o uso de vírgula (e não permitido o uso de ponto decimal), no caso, as impedâncias são as reatâncias de sequência positiva e negativa (deixando-se em vazio ou ignorando-se o campo da reatância de sequência zero). Ao clicar na setinha voltada para baixo no *frame* index_LT é exibido uma lista indexada contendo 72 elementos X:Y ou Y:X (são 9x9 = 81 indexações menos 9 indexações X:X da diagonal principal). Assim, movendo a barra de rolagem da lista indexada da LT até o elemento 7:8 procede-se ao clique desse índice. Dessa maneira, os elementos 7:8 e 8:7 são automaticamente bloqueados para inserção de reatâncias de transformador ou outra LT;

Passo 5-EX1: recomenda-se a inserção de pelo menos dois elementos de SEP (para N = 2 barras), admitindo-se, inclusive, a possibilidade de decomposição da reatância da LT em duas partes iguais (ou qualquer outra proporção), ajustando a numeração do diagrama unifilar em estudo. Assim, após o preenchimento de todos elementos do SEP, procede-se ao clique do botão "Definir Base", preenchendo-se a tensão de base, a potência de base e a barra do lado da base;

Passo 6-EX1: se o lançamento foi realizado corretamente (é requirido atenção e inclusive um check list com uso de lapiseira sobre o diagrama em estudo), procede-se ao clique do botão "Carregar Formulário", será emitido alguns avisos sobre a tensão de base das outras barras e avisos de progresso, ao final, deve ser emitido um aviso de conclusão, clique em "Ok" em todos avisos – ignore o aviso sobre impossibilidade de inversão da matriz de sequência zero, devido ao determinante ser nulo;

Passo 7-EX1: após o aviso de conclusão, o SHOT-C terá carregado uma memória contendo Y-Barra e Z-Barra, assim é possível ignorar o passo 7 e ir direto para janela inicial para

cálculo das correntes de curto-circuito, se desejar. Recomenda-se, contudo, clicar nos botões “Sequência Negativa” e “Sequência Positiva”, aquilo que se desejava calcular, para verificar, $Zpu-$, $Ypu-$ e Zth_pu-, para sequência negativa, e, $Zpu+$, $Ypu+$ e Zth_pu+, para sequência positiva.

Exemplo EX2: para inserir duas linhas de transmissão, uma entre as barras 7:8 e outra entre as barras 1:2 de um SEP radial com 8 barras, onde se deseja calcular somente a sequências positiva, procede-se aos seguintes passos – o SHOT-C ainda não possui mecanismo de recriar listas menores após inserir uma lista maior, então é preciso reiniciar o SHOT-C, fechando-o, clicando-se, novamente, duas vezes, em seu ícone da área de trabalho:

Passo 1-EX2: preenche-se a caixa de valor com o número 8 e procede-se ao clique do botão “Definir”;

Passo 2-EX2: procede-se ao clique do botão “Carregar índices XY”;

Passo 3-EX2: o SHOT-C pergunta se deseja limpar o Formulário, os valores prévios são somente de exemplo, podendo ser reutilizados, com exceção dos *toggles*;

Passo 4-EX2: ao clicar na setinha voltada para baixo no *frame* index_LT é exibido uma lista indexada contendo 56 elementos X:Y ou Y:X (são 8x8 = 64 indexações menos 8 indexações X:X da diagonal principal). Assim, movendo a barra de rolagem da lista indexada da LT até o elemento 1:2 procede-se ao clique desse índice – após ter inserido o valor de reatância de sequência positiva. Novamente, movendo a barra de rolagem da lista indexada da LT até o elemento 7:8 procede-se ao clique desse índice – após ter inserido o valor de reatância de sequência positiva. Consequentemente, os elementos 1:2, 2:1, 7:8 e 8:7 são automaticamente bloqueados para inserção de reatâncias de transformador ou outra LT;

Passo 5-EX2: após o preenchimento de todos elementos do SEP – não é permitido forçar impedâncias em aberto, ou seja, se são 8 barras, deve haver uma combinação de unifilar que conecte a barra 1 à barra 8, procede-se ao clique do botão “Definir Base”, preenchendo-se a tensão de base, a potência de base e a barra do lado da base;

Passo 6-EX2: se o lançamento foi realizado corretamente (é requirido atenção e inclusive um check list com uso de lapiseira sobre o diagrama em estudo), procede-se ao clique do botão “Carregar Formulário”, será emitido alguns avisos sobre a tensão de base das outras barras e avisos de progresso, ao final, deve ser emitido um aviso de conclusão, clique em “Ok” em todos avisos – ignore o aviso sobre impossibilidade de inversão das matrizes de sequências negativa e zero, devido ao determinante ser nulo;

Passo 7-EX2: após o aviso de conclusão, o SHOT-C terá carregado uma memória contendo Y-Barra e Z-Barra, assim é possível ignorar o passo 7 e ir direto para janela inicial para

cálculo das correntes de curto-circuito, se desejar. Recomenda-se, contudo, clicar no botão de “Sequência Positiva”, aquilo que se desejava calcular, para verificar, $Zpu+$, $Ypu+$ e Zth_pu+, para sequência positiva.

Exemplo EX3: para um SEP radial com 4 barras, inserir: um transformador, de núcleo envolvente e ligação estrela aterrado no primário e secundário, entre as barras 1:2, duas linhas de transmissão, uma entre as barras 2:3 e outra entre as barras 2:4, e por fim, um gerador síncrono na barra 1 e um motor síncrono na barra 3. Onde se deseja calcular as sequências positiva, negativa e zero, procede-se aos seguintes passos – o SHOT-C ainda não possui mecanismo de recriar listas menores após inserir uma lista maior, então é preciso reiniciar o SHOT-C, fechando-o, clicando-se, novamente, duas vezes, em seu ícone da área de trabalho:

Passo 1-EX3: preenche-se a caixa de valor com o número 4 e procede-se ao clique do botão “Definir”;

Passo 2-EX3: procede-se ao clique do botão “Carregar índices XY”;

Passo 3-EX3: o SHOT-C pergunta se deseja limpar o Formulário, os valores prévios são somente de exemplo, podendo ser reutilizados, com exceção dos *toggles*;

Passo 4-EX3: ao clicar na setinha voltada para baixo no *frame* index_LT é exibido uma lista indexada contendo 12 elementos X:Y ou Y:X (são 4x4 = 16 indexações menos 4 indexações X:X da diagonal principal). Assim, movendo a barra de rolagem da lista indexada da LT até o elemento 2:3 procede-se ao clique desse índice – após ter inserido os valores de reatâncias. Novamente, movendo a barra de rolagem da lista indexada da LT até o elemento 2:4 procede-se ao clique desse índice – após ter inserido os valores de reatâncias de sequência. Consequentemente, os elementos 2:3, 3:2, 2:4 e 4:2 são automaticamente bloqueados para inserção de reatâncias de transformador e outra LT. O próximo elemento de SEP que pode ser inserido (não tem ordem de preferência) é o transformador, movendo-se a barra de rolagem do Formulário evidencia-se o *frame* do index_Trafo, ao clicar na setinha voltada para baixo, do referido *frame*, tem-se acesso a outra lista indexada contendo 12 elementos, procede-se ao clique do índice 1:2 – após ter inserido os valores de reatância, tensões nominais e potência nominal, além de selecionar o tipo de núcleo e o tipo de ligação (como mostrado nos sub-passos 4.1 e 4.2 da Figura 69 para transformadores). Consequentemente, os elementos 1:2 e 2:1 são automaticamente bloqueados para inserção de reatâncias de outro transformador ou de uma LT. Por fim, na região do Formulário destinada ao motor síncrono (*frame*), clica-se na setinha voltada para baixo no *frame* index_Motor, e com isso é exibido uma lista indexada contendo 4 elementos X:X (4 indexações X:X da diagonal principal), localizado o índice 3:3 procede-se ao clique sobre esse. De forma análoga, na região do Formulário destinada ao gerador síncrono (*frame*), clica-se na setinha voltada para

baixo no *frame* index_GE, e com isso é exibido uma lista indexada contendo 4 elementos X:X (4 indexações X:X da diagonal principal), localizado o índice 1:1 procede-se ao clique sobre esse. As máquinas síncronas terão seus índices, na ordem, 3:3 e 1:1, bloqueados para inserção de qualquer outra máquina síncrona e só deve se procede ao clique dos referidos índices após ter inserido os valores de reatância, tensões nominais e potências nominais, além de selecionar o tipo de ligação (como mostrado nos sub-passos 4.1 da Figura 69 para máquinas síncronas);

Passo 5-EX3: após o preenchimento de todos elementos do SEP procede-se ao clique do botão “Definir Base”, preenchendo-se a tensão de base, a potência de base e a barra do lado da base;

Passo 6-EX3: se o lançamento foi realizado corretamente (é requirido atenção e inclusive um check list com uso de lapiseira sobre o diagrama em estudo), procede-se ao clique do botão “Carregar Formulário”, será emitido alguns avisos sobre a tensão de base das outras barras e avisos de progresso, ao final, deve ser emitido um aviso de conclusão, clique em “Ok” em todos avisos;

Passo 7-EX3: após o aviso de conclusão, o SHOT-C terá carregado uma memória contendo Y-Barra e Z-Barra, assim é possível ignorar o passo 7 e ir direto para janela inicial para cálculo das correntes de curto-circuito, se desejar. Recomenda-se, contudo, clicar nos botões de “Sequência Zero”, “Sequência Negativa” e “Sequência Positiva”, aquilo que se desejava calcular, para verificar, $Zpu0$, $Ypu0$ e Zth_pu0, para sequência zero, $Zpu-$, $Ypu-$ e Zth_pu-, para sequência negativa, e, $Zpu+$, $Ypu+$ e Zth_pu+, para sequência positiva.

Com apenas esses 3 exemplos é possível ter uma visão geral da usabilidade do SHOT-C, com dois adendos:

- as interfaces gráficas do SHOT-C foram construídas para serem centralizadas, uma vez que ao se minimiza a janela inicial e em seguida maximizá-la, havendo várias janelas do SHOT-C em aberto, então todas as janelas estarão sobrepostas após a maximização, requerendo-se arrastar as janelas com mouse para visualizar quais estão em aberto;

- não é preciso reabrir a janela da ligação do transformador a cada novo transformador, uma vez que, para seleção do tipo de ligação, armazena-se temporariamente um número dessa ligação até que se clique no índice desejado, carregando-se, assim, ao clique desse índice, em definidido, o número da ligação.

FIM.